EXEDRA
Aspectos geológicos del origen de la vida sobre la Tierra
M. G. Rutten
EDITORIAL ALHAMBRA, S. A.

EXEDRA
30
CIENCIA
TECNICA
INGENIERIA

I QUIMICA
II FISICA
III FISICO - QUIMICA
IV BIOQUIMICA
V BIOLOGIA
VI QUIMICA INDUSTRIAL
VII INGENIERIA
VIII ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA
IX GEOLOGIA
X MATEMATICAS
XI ARQUITECTURA
XII HISTORIA Y FILOSOFIA DE LAS CIENCIAS
XIII METALURGIA



Sección IX GEOLOGIA (1)

Director

Dr. José María Ríos
Catedrático de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid

M. G. Rutten
Professor of Geology, State University Utrecht
(The Netherlands)

Aspectos geológicos del origen de la vida sobre la tierra

Versión española de
Cecilio Sánchez Gil
Licenciado en Filosofía y Letras

Bajo la supervisión de
José María Ríos
Catedrático de la E.T.S. de Ingenieros de Minas, de Madrid

EDITORIAL ALHAMBRA, S.A.
MADRID BUENOS AIRES MEXICO

Edición original:

THE GEOLOGICAL ASPECTS OF THE ORIGIN OF LIFE ON EARTH

© ELSEVIER PUBLISHING COMPANY
Amsterdam

Primera edición española, 1968

© EDITORIAL ALHAMBRA, S. A.
R. E. 182
Madrid-1. Claudio Coello. 76

Depósito legal: M. 3309-1968

Impreso en España

SELECCIONES GRAFICAS (Ediciones) - Paseo de la Dirección, 52. Madrid

INDICE

CAPITULO 1

Introducción

INTERES POR EL FUTURO DE LA VIDA EN LA TIERRA

Dada mi calidad de naturalista especializado en Geología, hubiera debido interesarme desde un principio el origen de la vida en la Tierra, sobre todo en sus aspectos geológicos. Pero no fue así. Todo lo contrario, me cautivaron tanto ya en los comienzos de mi carrera otras facetas de la historia geológica de nuestro planeta, que el origen de la vida quedó totalmente fuera de mis centros de interés. Sólo mucho más tarde, y aun entonces solamente por una feliz coincidencia, llamó mi atención este tema. Este acontecimiento venturoso se produjo con motivo de ciertas preguntas exploratorias que planteó el fallecido microbiólogo, Profesor A. KLUYVER, de Delft.

Entonces fue cuando me di cuenta por primera vez de la enorme importancia que concede la Biología moderna, en especial los microbiólogos y los bioquímicos, al estudio de la forma en que surgió la vida sobre la faz de la Tierra. Simultáneamente advertí que es necesario que la Geología considere la actitud que le corresponde adoptar ante estas nuevas tendencias. No sólo debemos analizar nuestras propias adquisiciones de conocimientos para ver la manera de incorporarlas a las teorías de los biólogos, sino que además debiéramos estudiar los cauces adecuados por los que debemos orientar la investigación geológica con objeto de ayudar a descifrar este enigma.

Estimo que la mayoría de los geólogos se encuentran en mi mismo caso. Por eso viene este libro a informarles acerca de los problemas relativos al origen de la vida, esos problemas que la mayor parte de ellos han excluido de la práctica de su rutina diaria. Por otra parte, son muchos los biólogos que quieren saber lo que opinan los geólogos sobre estas cuestiones y cuáles sean los hechos concretos que puede aportar la Geología para su solución. Al escribir este volumen he te-

nido presentes, sobre todo, estos dos grupos de lectores. Confío, sin embargo, en haber acertado a presentar las tendencias básicas de la investigación y de la especulación con la suficiente amplitud para que pueda interesar también a un público más general.

El origen de la vida sobre la Tierra es un tema que rebasa el interés científico de los especialistas —geólogos y biólogos— para captar la atención del hombre de la calle, ya que constituye, por decirlo así, la base de nuestra existencia cotidiana: de la tuya, de la mía y la de todo ser humano.

Esto sin contar, naturalmente, con la importancia capital que reviste este problema desde el punto de vista religioso. Muchos eclesiásticos de todas las confesiones ven en este dilema —creación o aparición de la vida en la Tierra por evolución natural— una cuestión vital, que pudiera afectar a la misma esencia de la religión. Como geólogo, me he esforzado por presentar con claridad los hechos que conocemos y los métodos que empleamos, dada nuestra manera de pensar, para integrarlos en una estructura mental. Naturalmente, como geólogo, me he abstenido de abordar las posibles repercusiones que pudieran originar estos esquemas en la enseñanza religiosa. Creo cumplir mi cometido si logro comunicar al lector interesado, de una manera comprensible, los aspectos del problema que a mí me atañen, a saber los descubrimientos de un naturalista con una formación especializada en Geología.

LOS GEOLOGOS Y EL ORIGEN DE LA VIDA

Antes de seguir adelante, creo que lo mejor será examinar el fondo de la imagen hasta llegar a comprender la actitud negativa que adoptan muchos geólogos ante los problemas relativos al origen de la vida en la Tierra.

La historia geológica cubre un lapso enorme y plantea a los geólogos una serie de enigmas tan apasionantes y variados como difíciles de resolver en la mayoría de los casos. Sólo después de largos y penosos trabajos se puede intentar responder a tal o cual problema concreto de esa serie de cuestiones. Cierto que esos trabajos resultan altamente románticos: hay que trabajar sobre el terreno, obtener su cartografía, explorar abruptas montañas y selvas impenetrables; ya eso,

lógicamente, basta a consumir buena parte de las energías del científico; pero es que, además, esa labor tiene que completarse con la tarea, no menos entretenida y trabajosa, de estudiar al microscopio o analizar químicamente los ejemplares de rocas y de identificar y clasificar los fósiles recogidos.

Es, pues, natural que los geólogos tiendan a concentrarse en el estudio de los problemas que parecen presentar una solución relativamente fácil, y para cuya investigación se dispone de suficientes datos y hechos materiales. Esto les ha llevado a concentrar su atención, de entre los problemas relativos al desarrollo de la vida sobre la Tierra durante el pasado geológico, al estudio de la evolución posterior de la vida. Aunque la información que nos suministra la Paleontología es enormemente incompleta, al menos los seres vivos que habitaron la Tierra dejaron estampada su huella, en los fósiles, durante los últimos 500 millones de años. Lo que ofrece amplio material de trabajo para entretener a todos los paleontólogos que se quiera durante muchos años.

Comparados con estos conocimientos paleontológicos, resultan extremadamente escasos los datos que nos aporta la Geología sobre el origen mismo de la vida, que se remonta a épocas aún más remotas. En este libro se exponen las razones y motivos de este fenómeno; pero el hecho es que contamos con muchísimos más datos sobre la evolución posterior de la vida en nuestro planeta que sobre su periodo inicial.

Hay un punto más que debemos recordar en este caso concreto, y es la resistencia que ha opuesto la gente de Iglesia a la investigación de la historia de la vida sobre la Tierra durante el pasado geológico. Muchos elementos religiosos, lo mismo clérigos que seglares, de la estricta ortodoxia, consideraron, y en ciertos casos aún continúan considerando, como anatema cualquier tentativa por penetrar en la historia de la vida sobre la Tierra, no ya si se trata de explicar su origen por el concurso de las causas naturales, sino aunque "solamente" se intente trazar su evolución natural ulterior. Al intentar salvar esa muralla dogmática que se alzaba contra sus legítimos derechos a la investigación científica, era natural que los geólogos concentrasen su atención en explotar el punto en que se sentían más fuertes, es decir, en la evolución de la vida durante los últimos 500 millones de años.

Dentro de esta misma mentalidad, notaron los geólogos el hecho curioso de que muchas veces es más fácil conciliar la teoría de la evolución natural con las versiones populares del dogma eclesiástico cuando se deja su origen en cierta penumbra nebulosa, en una especie de *generatio spontanea*, que cuando se trata de integrarla en un sistema en el que toda la vida, incluido su origen, depende de una serie de procesos naturales. En la primera de estas dos concepciones se establece una separación entre la Creación y la evolución natural. En el transcurso de discusiones entabladas con motivo de tal o cual conferencia sobre la evolución de la vida en la Tierra, saqué muchas veces la impresión de que de esa manera la Creación se puede aceptar en virtud de la fe y de la autoridad de la Iglesia, mientras que la evolución natural se puede admitir en vista de los datos paleontológicos. Pero aun así ha habido que superar grandes obstáculos. Es más, éstos variaban sensiblemente según el tipo de seres cuya evolución se estudiaba. Así como en muchos colegios se permite explicar los problemas sexuales siempre que no se salga uno del reino de las florecitas y las abejitas, y acaso hasta del caballo, pero manteniendo siempre como tabú el mono y el hombre desde el punto de la reproducción, así las teorías transformistas encontraban mayor resistencia a medida que se acercaban más a las especies más próximas al hombre. Conozco a un paleontólogo de fama mundial que al fin de sus conferencias públicas no admite discusión alguna cuando habla sobre el origen del hombre; en cambio, le encanta hacerlo cuando ha tratado de caballos o de ammonites.

Así es que, por una parte, los geólogos tenemos la posibilidad de dedicarnos a la investigación paleontológica y, en concreto, al estudio de la vida en la Tierra a base de un rico arsenal de datos establecidos. Es cierto que el material paleontológico presenta todavía lagunas tan grandes, que cualquier persona predispuesta en contra puede impugnar la evolución natural; pero toda la marcha de la investigación paleontológica apunta inequívocamente hacia su aceptación general. Muchas de esas lagunas, de esas casillas aún vacías, se han ido cubriendo últimamente gracias a tal o cual hallazgo feliz, y estamos seguros del resultado final de toda esta búsqueda.

Pero por otra parte está el problema del origen de la vida sobre la Tierra. Aquí nuestra documentación es enormemente pobre. Es tan inmenso el lapso transcurrido, que resulta difícil probar absolutamente nada; pues, además de la penuria casi total de datos a causa de la pobreza de los registros, muchas veces los materiales han sufrido cambios radicales debido a acontecimientos más recientes. A esto se añade que esta clase de investigación parece implicar que se ponga en duda la creencia popular acerca de la Creación, y ello provoca críticas por parte del mundo eclesiástico, fundadas en razones de orden inmaterial; críticas a las que no se puede responder de una manera contundente por falta de datos.

De aquí que se experimentase en Geología cierto derrotismo. Aunque acaso nunca se llegase a formularla de una manera explícita, de hecho se adoptó por mucho tiempo la actitud de: "Dejémonos de complicaciones y vamos a estudiar la evolución de la vida en la Tierra durante estos últimos 500 millones de años. Sólo con esto tenemos trabajo cortado para rato. En cuanto al origen de la vida sobre la Tierra, podemos relegarlo al dogma de la Creación o a cierta especie de generación espontánea. Debido a la falta de datos, este punto no está aún maduro para la investigación científica. Y mientras las cosas sigan así, lo mejor que podemos hacer los científicos es dejarlo en paz y no jugar con fuego. Cada cual es libre para filosofar sobre ello a discreción; pero nosotros carecemos de base científica real que pueda servirnos de punto de partida."

TRATAMIENTO BIOLOGICO DEL PROBLEMA

Hoy día la situación ha variado completamente. Ese cambio radical de panorama no se debe principalmente a la Geología, aunque también en este campo se han obtenido datos nuevos sumamente interesantes y se han perfeccionado las técnicas de dataciones absolutas —de las que trataré extensamente más adelante—, lo que nos permite comprender mucho mejor el planteamiento del problema desde el punto de vista geológico. El verdadero impulso en esta dirección lo han dado los biólogos desde el momento en que se interesaron por este tema en serio y en gran escala. Este interés se avivó sensiblemente a partir de la II Guerra Mundial. Ahora

ya no se pide exclusivamente a la Geología la respuesta definitiva a este problema. Muy al contrario, es la Biología la que ha llegado ya a ciertas hipótesis concretas, y prosigue tenazmente su trabajo de investigación en esta materia, basándose principalmente en la Microbiología y en la Bioquímica. Actualmente la Biología estudia, desde un punto de vista teórico, el posible origen de la vida en la Tierra mediante el concurso de factores naturales. Con esto no se prueba que de hecho surgiese así la vida en nuestro planeta, pero nos proporciona una hipótesis aceptable que puede servirnos de trampolín para un estudio ulterior. Ahora se trata de fijar el marco geológico en que se originó la vida y la posibilidad de que realmente se produjesen en la historia geológica de la Tierra esos procesos que postula la investigación biológica.

LA RELIGION Y EL ORIGEN DE LA VIDA

Por supuesto que esta cuestión es objeto todavía de vivas controversias, pues toca las fibras más profundas de los conceptos religiosos y éticos de toda persona educada. Es evidente que Rusia no obedecía a motivos puramente científicos al constituirse en avanzada de esta nueva ola de interés por conocer el origen de la vida en la Tierra. Así como los grupos religiosos se opusieron a que se investigasen los procesos históricos de la vida, por el contrario, la doctrina marxista fomentó expresamente los estudios en ese sentido. Frente a aquel afán por salvaguardar las creencias populares de la Iglesia, los rusos, como era de esperar, adoptaron la postura contraria con el propósito obvio de poder atacar esas creencias. Se fijó como meta establecer una teoría de la vida totalmente materialista, no sólo por lo que respecta a su evolución, sino también a su origen; o, expresado de una forma tal vez demasiado tajante, se propuso acabar de una vez con el "mito" de la Creación.

Me ha parecido necesario exponer este trasfondo, religioso o antirreligioso y ético, del problema sobre el origen de la vida en la Tierra precisamente porque está tan hondamente arraigada en muchas cabezas, y por lo difícil que resulta desentenderse de este subconsciente para remontarse a un punto de mira de máxima objetividad posible. Al leer los escritos

más recientes sobre este tema, ha sido de gran satisfacción notar la calidad académica y el sentido de objetividad de toda la investigación de estos últimos años. Da la impresión que en estas publicaciones no han influido para nada tendencias ni dialécticas marxistas ni religiosas. Se limitan a informarnos sobre experimentos o teorías científicas: algunas de ellas se mueven en el plano de la alta especulación, fundándose en esos experimentos o en fenómenos geológicos o astronómicos y en las hipótesis derivadas de ellos, de una forma sumamente vigorosa, pero siguiendo las directrices del método científico y basándose exclusivamente en la Ciencia.

UNA PALABRA ACERCA DE ESTE LIBRO

En vista de lo dicho, este libro se propone ventilar de una manera igualmente objetiva los hechos y las teorías que nos ofrece la Geología sobre el tema del origen de la vida. Como no va dirigido únicamente a los geólogos, me esforzaré en poner de relieve los presupuestos básicos que cimentan cualquier presentación de los hechos de la historia de la Tierra. El origen de la vida se remonta a una época muy remota de esta historia; de hecho incluso más remota que las épocas con las que están familiarizados la mayoría de los geólogos. En estos últimos años han aparecido muchos libros de divulgación sobre Geología; y así puedo suponer que una buena parte de los lectores tendrá algunos conocimientos sobre esta materia. Sin embargo, la mayoría de estos libros populares, al igual que casi todos los libros de texto, destacan solamente los últimos 500 millones de años de la historia de la Tierra. Esta constituye la geología "normal", fácil de divulgar mediante gran número de grabados o fotos de fósiles. En cambio, nuestro tema, es decir, el origen de la vida, nos retrotrae como mínimo hasta los 3 000 millones de años. Consiguientemente, pondré sumo empeño en acentuar las diferencias entre este primer periodo, mucho más largo, pero mucho menos conocido, y la época mejor conocida y mucho más divulgada de la historia de "sólo" los últimos 500 millones de años.

RECONOCIMIENTOS

Son muchas las personas que me ayudaron en la confección de este libro, pero sólo me es posible mencionar aquí a unas cuantas. Debo la autorización para reproducir los grabados a la Pergamon Press —figuras 8, 9, 10 y 14—, al profesor A. HOLMES —figura 6—, a los profesores M. GRAVELLE y M. LELUBRE y a la Sociedad Geológica de Francia —figuras 25 y 26—. También me otorgaron su permiso, y hasta me facilitaron grabados nítidos para hacer nuevos clisés, el Dr. A. WILSON y los profesores P. RAMDOHR y E. S. BARGHOORN, quien además me envió nuevas figuras sin publicar de los primeros fósiles conocidos, formadas por él mismo y por el profesor S. A. TYLER. El original a máquina lo leyeron en parte los profesores R. HOOYKAAS, J. TH. G. OVERBEEK y H. P. BERLAGE y el Dr. E. TEN HAAF; Mr. P. VAN DER KRUK lo revisó íntegramente en plan crítico. Todos ellos contribuyeron a mejorar sensiblemente el libro.

CAPITULO **2**

Uniformismo y actualismo

UN POCO DE FILOSOFIA ACERCA DE ESTOS DOS TERMINOS

Las dos voces que sirven de epígrafe a este capítulo tienen casi el mismo sentido: indican el supuesto de haber existido cierta continuidad en los procesos físicos de la historia geológica. Los anglosajones usan preferentemente la palabra "uniformismo", mientras que los europeos continentales expresan el mismo principio en sus respectivos idiomas con vocablos como *actualisme* —francés— y *Aktualismus* —alemán—; los cuales se prestan fácilmente a un especie de seudotraducción al verterlos al inglés por "actualism".

A pesar de esto, ambos términos acentúan fuertemente dos aspectos diversos de una misma línea de raciocinio que es fundamental en toda la Geología moderna. Se piensa que los procesos físicos que se producen en la Tierra y sobre ella están sujetos a unas leyes naturales invariables y, por lo mismo, más o menos uniformes y continuadas en el pasado; de aquí la palabra uniformismo. Una vez aceptada esta hipótesis, se pueden estudiar los procesos actuales y extrapolarlos al pasado geológico para interpretar nuestros descubrimientos concretos en orden a formar un cuadro genético, histórico. De aquí el término "actualismo".

El uniformismo o actualismo se opone a la antigua doctrina del catastrofismo, tal como se aplicaba a la historia de la Geología.

Antes de entrar de lleno en este tema de la continuidad *versus* catastrofismo, creo conveniente introducir una digresión acerca del valor y papel que desempeñan semejantes principios filosóficos fundamentales en Geología, para apreciar el lugar que corresponde en el mecanismo del pensamiento geológico a conceptos mentales tales como los del uniformismo.

El mero hecho de mencionar la Filosofía en relación con la Geología acaso parezca poco feliz a más de un lector, por

no decir algo más fuerte, ya que no suelen abundar los buenos filósofos entre los geólogos. Esto, a mi juicio, procede a su vez de que los fenómenos que ofrece a nuestro estudio el gran planeta que habitamos presentan una gama tan inmensamente variada, que jamás es posible expresar en solas descripciones una idea completa de ninguna de sus fases. No hay descripción verbal capaz de comunicar toda la información que encierra una sola veta de rocas a quien la ha visto con sus ojos. Esto se aprecia claramente en cualquier relato de viajes de cualquier geólogo que, al visitar por primera vez ciertos parajes sobre los que acaso había oído y leído muchísimo, comprueba que la idea que se había forjado era aún muy nebulosa. Sea un geólogo europeo que se traslada a las Montañas Rocosas o a los Apalaches, o un americano a los Alpes, el resultado será el mismo: el buen hombre proclamará extasiado su suerte al haber podido contemplar por fin esas maravillas con sus propios ojos y poder contrastar así, mediante su inspección personal, las impresiones incompletas e inadecuadas y faltas de equilibrio que había sacado de los libros.

Generalmente, las descripciones geológicas sólo nos cuentan parte de la verdad. O bien se recarga el acento en un punto principal, incurriendo en un exceso de simplificación, o, lo que es más frecuente, se detallan minuciosamente ciertos pormenores excepcionales, olvidando que son muy pocos los lectores que pueden dar por conocida realmente la descripción general.

El hecho de que resulte casi imposible expresarnos con solas palabras no implica, naturalmente, una propensión espontánea para escribir densos ensayos filosóficos, cuyo significado último reside en palabras y nada más que en palabras. Los geólogos tienden a suministrar cuantas ilustraciones tienen a mano: fotos, mapas, cortes. El resto queda a la imaginación de cada cual: tendencia que cristalizó, por ejemplo, en aquel *slogan* de un geólogo suizo: "Hingehen und gucken", o sea, "Vaya a verlo".

Me he permitido hacer esta digresión porque creo necesario aclarar esta faceta de la mentalidad del geólogo antes de embarcarnos en la discusión del uniformismo y de su conexión con el origen de la vida sobre la Tierra. Tanto el uniformismo como la doctrina anterior del catastrofismo pertenecen a la filosofía básica geológica. Se las definió una y mil veces, tuvieron sus partidarios y antagonistas, pero la literatura destinada a desarrollar expresamente estas dos tendencias conceptuales básicas es escasa. El único estudio, sumamente concienzudo, que aborda el uniformismo como tal se encuentra en el libro del profesor Hooykaas, *Natural Law and Divine Miracle*, 1960; pero no fue escrito por un geólogo.

Como veremos más adelante, es muy difícil ofrecer una definición precisa del uniformismo o actualismo. Hemos de contentarnos con un esbozo general que deje margen para casos fronterizos. Para la mayor parte de los geólogos la cosa no es tan lamentable como pudiera parecer, pues en la práctica esos casos ambiguos son muy escasos en número y de poca importancia. En la mayoría de los casos no ofrecen dificultades ni la aplicación práctica del esquema ni siquiera su forma general. Por el contrario, cuando surgen las dificultades es cuando intentamos apurar nuestras definiciones. Entonces puede darse el caso de recurrir a distinciones donde en realidad no hay la menor diferencia. Estoy de acuerdo con Hooykaas, el cual, aunque en el texto subraya los diferentes aspectos del "uniformismo" y del "actualismo", en su comentario considera sinónimos ambos términos.

Yo también emplearé como sinónimos ambos términos como expresión del principio de cierta continuidad, que es el que subraya hoy día toda la filosofía geológica, aun cuando no se lo formule expresamente.

CATASTROFISMO Y UNIFORMISMO

Como dije antes, las doctrinas del catastrofismo y del uniformismo son fundamentales en la Filosofía geológica, a pesar de que con frecuencia no hayan sido bien expresadas. Por tanto, si queremos valorar el cuadro geológico que ofrecía la Tierra en aquellos días iniciales en que aparece la vida, hemos de tener en cuenta lo que significan en el estudio de la Geología. Cronológicamente, la primera de estas dos teorías fue la del catastrofismo. Se la fue reemplazando con tendencias mentales uniformistas, debido en gran parte al influjo de dos geólogos ingleses, Hutton (1726-1797) y Lyell (1797-1875).

Conforme al catastrofismo, los estados sucesivos por que

pasó la superficie terrestre, y que descubrió la Geología como acontecimientos del pasado, presentan diferencias tan enormes entre sí y con las formas actuales, que sólo pueden explicarse suponiendo que en determinados momentos de la historia del Globo ocurrieron repentinamente catástrofes descomunales. Las principales tuvieron el carácter de inundaciones repentinas a escala mundial y de erupciones volcánicas de análogas características. Aquí reconocemos, desde luego, la versión bíblica del Diluvio universal y la catástrofe volcánica del Vesubio, tal como la describió PLINIO el Joven; lecturas obligadas de todo intelectual en la Europa de los siglos XVIII y XIX.

Así, pues, ¿qué cosa más lógica que suponer la existencia de catástrofes similares para interpretar los fenómenos geológicos del pasado? Entonces la formación de una cordillera no era más que una convulsión repentina y catastrófica de la Tierra. Las inundaciones que cubrieron de pronto grandes zonas continentales tuvieron que deberse a lluvias torrenciales parecidas al Diluvio; la extinción de toda una fauna fósil fue el resultado de otra catástrofe fatídica, hasta ahora desconocida.

El uniformismo no niega que pudieran ocurrir catástrofes repentinas; pero nunca fueron de alcance mundial, ni puede compararse su efecto con el cambio gradual que experimenta actualmente la Tierra mediante procesos de pequeños efectos inmediatos, pero que operan durante enormes lapsos. Así entró en la Filosofía del uniformismo la idea de los inmensos intervalos de tiempo de que dispusieron los procesos geológicos.

EL TIEMPO EN GEOLOGIA

El hecho de caer en la cuenta de los fabulosos intervalos de tiempo que consumió la historia geológica de la Tierra ayudó gradualmente a que se fuese imponiendo la aceptación de la Filosofía actualista. Al principio, mucho antes de que se descubrieran las técnicas para fijar el tiempo con criterios absolutos, nada de esto podía probarse categóricamente, como es obvio. Lo único que podía hacerse, como en tantas otras cosas de Geología, era mostrar su probabilidad, y hasta quizá su aceptabilidad, a base de interpretar de una manera más bien subjetiva ciertos datos fácticos. Lo que creo que contribuyó más a divulgar la idea de los enormes efectos que pueden producir pequeñas causas actuando persistentemente durante periodos suficientemente largos fue la descripción que hizo LYELL de los antiguos templos de los alrededores de Nápoles, que se vieron inundados temporalmente a causa de ligeros cambios de elevación respecto al nivel del Mediterráneo.

Según una parábola china, se puede dar una idea de la Eternidad con esta imagen: en un país del remoto Norte un pajarito se posa una vez cada siglo en una montaña berroqueña, y para limpiarse el pico, lo pasa sobre la roca; pero cuando el pajarito haya desgastado la montaña a base de rozarla con su pico una vez cada centuria, sólo habrá pasado un segundo de la Eternidad. El poeta chino no era geólogo, porque el geólogo ve cómo actúan continuamente hoy día muchos otros procesos más insignificantes, los cuales, sin llamar la atención del poeta ocasional, producen efectos mucho mayores que la erosión causada por el pico de este pajarito. Entre otras causas, y a falta de otros agentes, la mera erosión arrasa la cordillera mucho más rápidamente.

Este paralelismo entre el poeta chino y el geólogo escéptico nos hace ver que el tiempo es el más fuerte aliado del uniformismo. Concedido el tiempo necesario, movimientos terrestres de 1 mm al año, e incluso de 1 mm por siglo, pueden llegar a producir montañas y océanos. Con un margen de tiempo suficiente puede desarrollarse gradualmente una fauna nueva a partir de otra más antigua, mientras que las formas primitivas van muriendo casi imperceptiblemente. Con un margen de tiempo suficiente, una serie de pequeños terremotos repetidos pueden también levantar montañas y hundir en las profundidades oceánicas partes de los continentes. O, para aducir otro ejemplo, un volcán, sin tener ninguna erupción tan violenta como la del Vesubio descrita por PLINIO, llegará con el tiempo a enterrar por completo bajo su lava y sus cenizas volcánicas todos sus alrededores.

Cuando pensamos en la uniformidad con relación a los procesos que rigen el desarrollo de la Tierra, fácilmente podemos desconcertarnos por el *tempo* lentísimo de esos procesos. Dada nuestra mentalidad egocéntrica de seres humanos de corta duración, imaginamos la Tierra como algo estable y fuerte.

Nada más lejos de la realidad. Continentes enteros flotan sobre un substrato más pesado o, como decimos en nuestra jerga científica, se mantienen en equilibrio isostático. De hecho, raras veces logran ese equilibrio; a los ojos del geólogo están en constante trepidación. Los volcanes no cesan de arrastrar a la superficie partes de ese substrato; su obra pudiera compararse a la de una especie de topo, a escala terráquea. Entretanto, la erosión va atacando las montañas y colinas un poco elevadas, y lo hace constantemente, mientras que los detritus arrancados a los montes se van depositando en el fondo de las tierras bajas y de los mares.

Si queremos comparar nuestra propia historia humana con la de la Tierra, hemos de descartar completamente esa mentalidad egocéntrica y aceptar esas dimensiones astronómicas del tiempo en la historia de nuestro Globo como cosa corriente de cada día. Al comparar ambas vidas, debemos tener siempre presente que cada año de la vida humana corresponde aproximadamente a un millón de años en la historia de la Tierra.

EL TIEMPO, VISTO CON OJOS DE GEOLOGO

Por consiguiente, el geólogo no ve una Tierra estática, sino en constante movimiento. Ve formarse una masa informe de montañas, como los Alpes o Apalaches, que son atacadas inmediatamente por la erosión. Puede ver anchos mares invadiendo enormes zonas de los continentes, mientras en otros sitios se secan completamente grandes extensiones de mares someros que dejan espacio para unas exuberantes faunas y floras continentales, acompañadas tal vez por espectaculares acontecimientos volcánicos. Muchos geólogos llegan a ver, por ejemplo, continentes que migran sobre la superficie de la Tierra o se resquebrajan y sumergen parcialmente en las profundidades de los océanos.

Así es como lo ven los ojos del geólogo, que, gracias a un largo entrenamiento, han adquirido cierto instinto para acelerar su película mental. Por supuesto que una aceleración de un millón de veces comunica un aspecto catastrófico incluso al proceso más lento del mundo. Así es que lo que debemos tener siempre en cuenta es que estas revoluciones espectaculares, esos acontecimientos catastróficos de nuestra vieja

Tierra —¡y tan vieja!—, ocurren a paso de tortuga. La mayoría de los cambios geológicos se producen a un ritmo que puede calcularse muy a *grosso modo* entre 1 mm por siglo y 1 mm por año. Miradas así, la mayor parte de las catástrofes aparentes en la historia de la Tierra pueden explicarse por procesos normales que actúan en ella en la actualidad: lentos movimientos de la corteza, lentos cambios climáticos, erosión y sedimentación, repetidos fenómenos volcánicos o sísmicos.

VARIACIONES EN LA INTENSIDAD DE LOS PROCESOS: EL PULSO DE LA TIERRA

No hace falta que esos procesos hayan sido de hecho siempre uniformes en intensidad, aunque lo fuesen en calidad. Para aducir un ejemplo: conocemos diversas épocas glaciales en los tiempos recientes y en los más remotos del pasado geológico. Es cierto que una capa de hielo que cubriese la mayor parte de Norteamérica y de Europa noroccidental es algo más serio que las pequeñas manchas de hielo que todavía subsisten en Groenlandia, Islandia y Spitzberg; pero los procesos de formación de ambas capas de hielo son similares. Sólo difieren en extensión o volumen. Las condiciones climáticas locales, el excedente de las nevadas, el corrimiento del hielo hacia el borde del manto glacial, la formación de las morrenas y demás fenómenos imaginables son idénticos en ambos casos. A base de los procesos reales que hoy día se desarrollan y observamos en Groenlandia podemos interpretar los glaciares inmensamente mayores que cubrieron Norteamérica y Europa noroccidental en un pasado próximo. Los procesos son similares, aunque de diversa intensidad.

E inversamente, cuando encontramos fósiles de plantas tropicales o vestigios de antiguos dinosaurios en Groenlandia y Spitzberg, en sendimentos anteriores a la Edad glacial, deducimos que en aquella época existía un clima tropical en estos parajes situados tan al Norte. Y eso no por efecto de un cambio catastrófico repentino, debido, por ejemplo, al aumento de la cantidad de radiación recibida del Sol, sino en virtud de pequeños cambios, que pueden explicarse a base de insignificantes variaciones en intensidad de uno o varios de

los procesos que siguen actuando ahora, como lo hacían antes.

Por consiguiente, para un geólogo, todo está en movimiento. Hablamos de "esta Tierra inestable", de "esta Tierra móvil". Pero hay algo más; también reconocemos periodos concretos en que ciertos procesos pasan por un *ritardado* o por un *accelerato*. Es lo que supo expresar con suma concisión el manual del profesor UMBGROVE con el título sugestivo de *The Pulse of the Earth,* "El pulso de la Tierra". Pero esas mismas pulsaciones no se deben, como vimos, a ninguna catástrofe, sino a pequeños cambios en la intensidad de procesos realmente lentos.

LA ESQUEMATIZACION EN LOS ESCRITOS GEOLOGICOS

A quienes estén aún empeñados en ver algo catastrófico en las pulsaciones regulares de la Tierra, permítaseme indicar una vez más que el periodo de este pulso terrestre excluye cualquier comparación con ninguna catástrofe considerada a escala humana. Una pulsación de nuestro planeta en el sentido descrito por UMBGROVE tarda en producirse unos 250 millones de años. Entonces, ¿qué representa un día ni un año, ni siquiera toda la duración de la vida humana, en comparación con una pulsación de la Tierra?

No todos los geólogos suscriben el cuadro que pinta el profesor UMBGROVE, que sincroniza estrictamente diversos procesos diferentes de nuestro Globo al ritmo de pulsación de 250 millones de años. Naturalmente, es tan amplia la extrapolación de la experiencia presente, que puede dar lugar a gran número de opiniones distintas. Con todo, prescindiendo de las dudas que pueda ofrecer la sincronización estricta y la duración exacta de los periodos concretos en las primeras épocas de la historia de la Tierra, esos lapsos de unos 250 millones de años más o menos han quedado perfectamente establecidos para muchas y diferentes variaciones de intensidad en los fenómenos geológicos. Por otra parte, la teoría de Umbgrove de tantos procesos terrestres diferentes, variando regularmente al mismo tiempo con esa eterna lentitud, ayudará a grabar enérgicamente en la mente de los no geólogos esa distinción entre la historia humana y la de la Tierra.

Naturalmente, no podemos estar inculcando a cada momento en los escritos geológicos la importancia de estos inmensos periodos de tiempo; y aquí precisamente es donde muchos geólogos expresan, acaso con excesiva libertad, lo que ven con su imaginación cuando miran la lenta evolución de la Tierra con ojos entrenados expresamente para acelerar un millón de veces ese desarrollo. Cualquier aficionado que haya filmado escenas a cámara lenta puede hacerse una idea de lo que significa una aceleración del orden de un millón.

Como ilustración, voy a mencionar solamente un ejemplo, tomado de la literatura geológica: el proceso de las formaciones montañosas, u orogenia. La creación de nuestras grandes cordilleras actuales, como los Alpes, el Himalaya, los Andes, duró unos 50 millones de años. Durante ese periodo, los movimientos terrestres eran del tipo de 1 mm por año. Anteriormente, la corteza de la Tierra se había mantenido mucho más quieta, y eran normales los movimientos del orden de 1 mm por siglo. Además, ese periodo anterior y más estable duró muchísimo más tiempo: entre los 100 y los 200 millones de años, en números redondos.

Ahora, al proyectar la historia de la Tierra en su versión acelerada, los geólogos podemos sentirnos tentados a hablar de "la era catastrófica de las formaciones montañosas" o de "las revoluciones de la corteza" para describir ese periodo relativamente corto e inestable de la formación de las montañas, que "sólo" duró unos 50 millones de años. Nos gusta acentuar la diferencia entre este segundo periodo de las formaciones montañosas y el periodo anterior, más largo y más estable. Y al hacerlo, tendemos decididamente a exagerar la nota, no sé si por falta de palabras o por sobra de pereza. Muchas veces nos olvidamos de hacer constar expresamente que esas catástrofes, de que habla la literatura geológica, no tienen nada de parecido con los cataclismos humanos. Ese periodo catastrófico de las formaciones montañosas, para volver al ejemplo mencionado, fue sólo el resultado final de infinitos e imperceptibles movimientos, cuyos efectos se fueron sumando a lo largo de 50 millones de años.

Por consiguiente, ningún geólogo negará ni la movilidad de la Tierra ni la existencia de variaciones en velocidad e intensidad de los diferentes procesos que se desarrollan en

ella. Pero esto no constituye ninguna objeción para que se acepte el punto de vista actualista en la historia de la Geología y se sirva de las causas actuales para explicar los fenómenos de antaño.

CATASTROFES MENORES Y UNIFORMISMO

Para dificultar más aún la expresión de estas materias referentes al principio del uniformismo, debo añadir que dentro de este mismo cuadro actualista del pasado geológico llegan a darse de hecho ciertas catástrofes menores, aunque suficientemente importantes según nuestra escala humana. Refiriéndonos a los dos ejemplos mencionados anteriormente, el diluvio bíblico y la erupción del Vesubio de que nos habla PLINIO, abrigamos la seguridad de que en la historia de la Tierra se dieron muchas catástrofes parecidas.

Por ejemplo, las inundaciones son catástrofes pequeñas sumamente corrientes. Pueden ser debidas a causas físicas totalmente diferentes. Tenemos inundaciones de lluvia y de riadas, como en Mesopotamia; "tsunamis" debidos a los maremotos, como en el Pacífico; inundaciones debidas a temporales, como en las costas bajas de Holanda. Todas estas y otras causas producen inundaciones de consecuencias catastróficas locales. Toda inundación de cierta magnitud, cualquiera que sea su causa, pudo haber quedado incorporada a las leyendas de determinadas tribus, y con el tiempo se la pudo extrapolar para incluir efectos de mayor alcance que el original, si no es que se la convirtió en dogma de fe. Sin embargo, ninguna de dichas catástrofes alteraron en un momento dado la superficie de la Tierra lo más mínimo. Sólo a fuerza de repetirse infinidad de veces llegan a adquirir muy gradualmente tales inundaciones valor geológico.

Lo mismo puede decirse de las erupciones volcánicas. La misma erupción *plínica* del Vesubio sólo destruyó tres ciudades: Herculano, Pompena y Estabias, situadas todas ellas en su flanco sudoccidental. La erupción sólo afectó a la cuarta parte de la superficie de un solo volcán; el resto del Imperio romano siguió viviendo, no diré tan felizmente, pero al menos sin detener su marcha. Si PLINIO el Joven no llega a perder a su tío en ese lance, es muy dudoso que tuviésemos un relato tan detallado ni siquiera de esta erupción de categoría.

Así es que una inundación aquí, un seísmo allí y una explosión volcánica de propina, todo ello es perfectamente compatible con el uniformismo. Estas catástrofes menores proceden de procesos que están trabajando de hecho en la Tierra, pero sin alcanzar dimensiones mundiales.

Creo que lo mejor que podemos hacer para inculcar este carácter local de las catástrofes humanas, tanto en el espacio como en el tiempo, es volver al texto de los *Principios,* de LYELL. En las observaciones con que cierra su primer volumen, después de describir los estragos producidos por la actividad volcánica en el distrito de Nápoles, leemos lo siguiente: "Las señales de los cambios que han quedado impresas en él durante este periodo pudieran parecer a las generaciones posteriores indicación de una serie de desastres sin precedente... Si al estudiar estos fenómenos... consideramos las numerosas pruebas de catástrofes repetidas a que estaba expuesta esta región, acaso sintamos compasión por el infeliz estado de los pobres seres condenados a vivir en un planeta en su fase inicial y caótica, y nos felicitemos de que nuestra raza privilegiada haya escapado a semejantes escenas de anarquía y desenfreno."

Sin embargo, si seguimos el relato de LYELL, leemos: "¿Cuál era la situación real de la Campania (napolitana) durante esos años trágicos? Un clima, dice FORSYTH, en que el aliento del cielo tiene un perfume suave y acariciador —naturaleza vigorosa y lujuriante sin rival en sus productos—, unas costas que fueron un día el país encantado de los poetas y el retiro favorito de los hombres ilustres. Hasta los tiranos de la creación amaron esta región fascinante, la respetaron, la ornamentaron y vivieron y murieron en ella. Cierto que sus habitantes no estaban inmunizados contra las calamidades inherentes a la naturaleza humana; pero los males peores que sufrieron deben atribuirse a causas morales, no físicas —es decir, a sucesos desastrosos que el hombre pudo controlar, más que a los cataclismos provocados por la actividad subterránea—. Cuando ESPARTACO acampó con su ejército de diez mil gladiadores en el antiguo cráter extinto del Vesubio, entonces aquel volcán infundía más terror a la Campania —y con

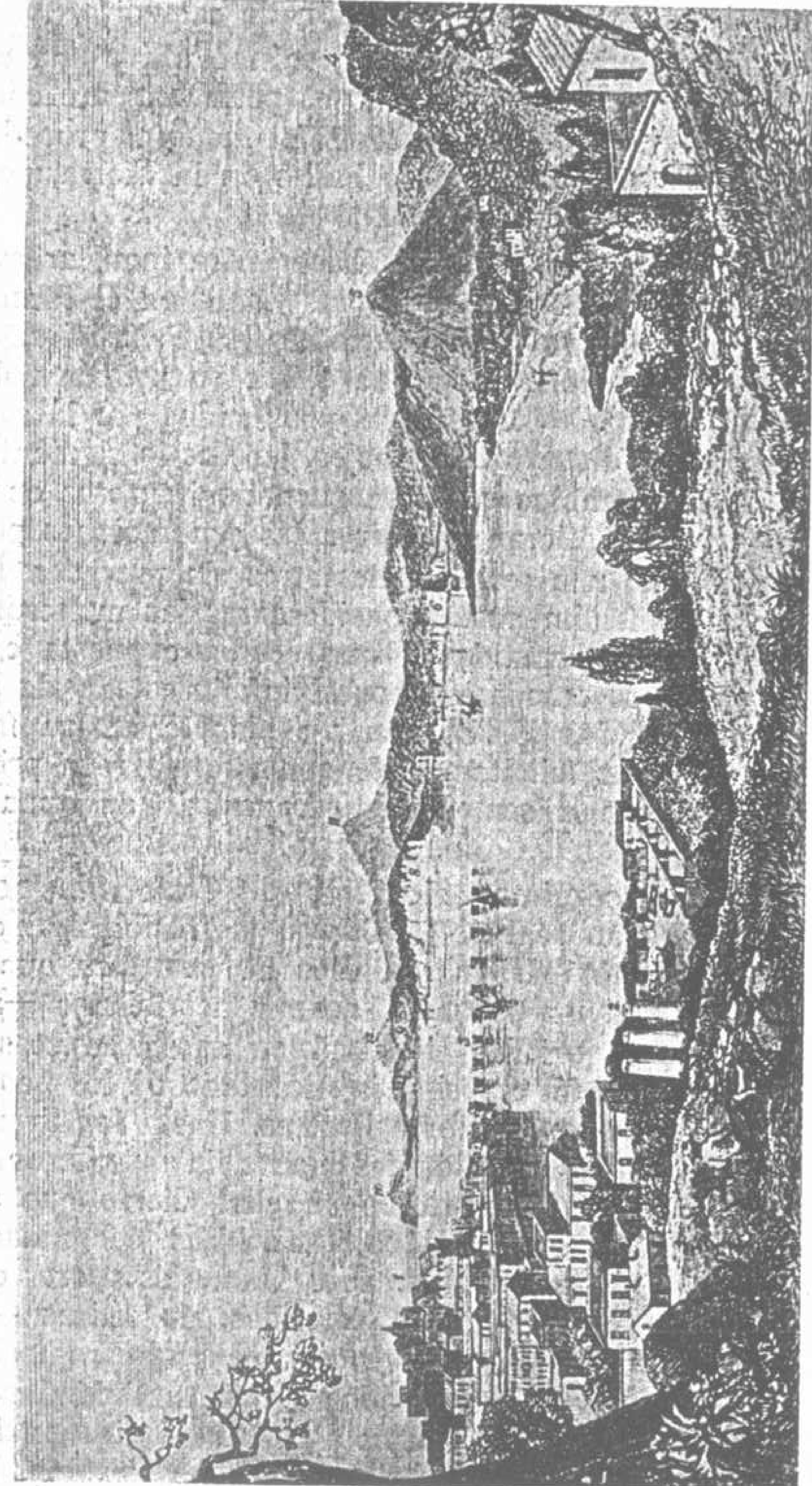


FIG. 1. Panorámica de la bahía de Balae, cerca de Nápoles, donde las erupciones volcánicas y los lentos movimientos de la corteza inspiraron a LYELL sus clásicas observaciones sobre el uniformismo (del dibujo original hecho por LYELL, 1875).

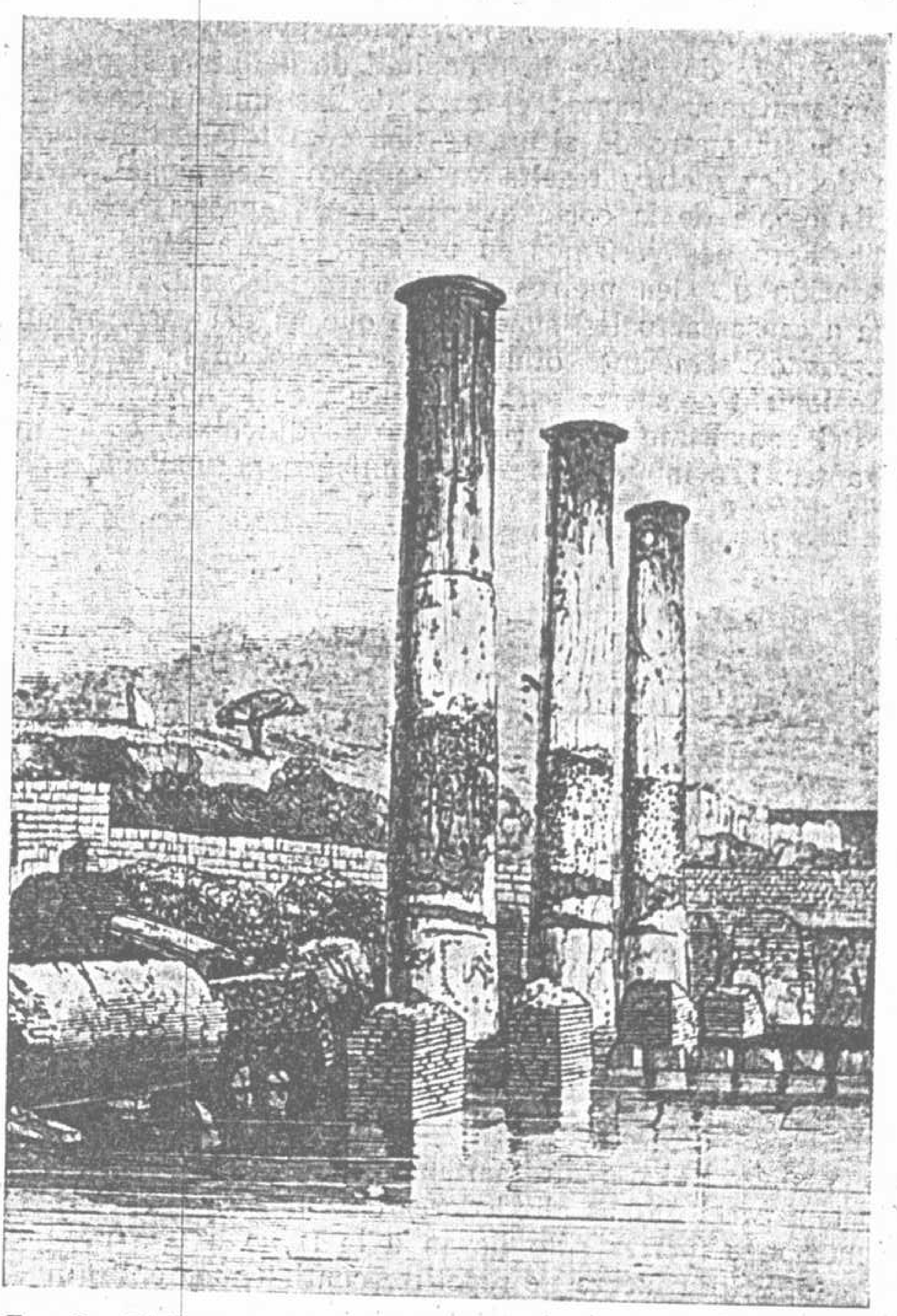


FIG. 2. El llamado Templo de Serapis en Pozzuoli, cerca de Nápoles, que ocupa un puesto preferente en el relato de LYELL, debido a sus cambios de altitud históricos y prehistóricos (del dibujo original hecho por LYELL, 1875).


FIG. 1. Panorámica de la bahía de Balae, cerca de Nápoles, donde las erupciones volcánicas y los lentos movimientos de la corteza inspiraron a LYELL sus clásicas observaciones sobre el uniformismo (del dibujo original hecho por LYELL, 1875).

razón— que el que haya podido causar jamás la renovación de sus erupciones" (LYELL, 1875, vol. I, pp. 654-655).

Esto pone de relieve la dificultad de definir con precisión el uniformismo. Veamos el caso de las inundaciones: una riada de un metro de altura es una cosa totalmente normal. Una de diez metros resulta ya un poco excepcional, medida con la escala de la corta experiencia de nuestra breve existencia. Pero nos veríamos en un aprieto para decidir si una inundación de cien metros de altura se debería atribuir todavía a causas actuales, suponiendo que un día encontrásemos vestigios de semejante diluvio catastrófico en la historia de la Geología. Por suerte para el geólogo, en la aplicación práctica del actualismo no se presenta esta dificultad, como indiqué antes. Las inundaciones se mantienen normalmente entre

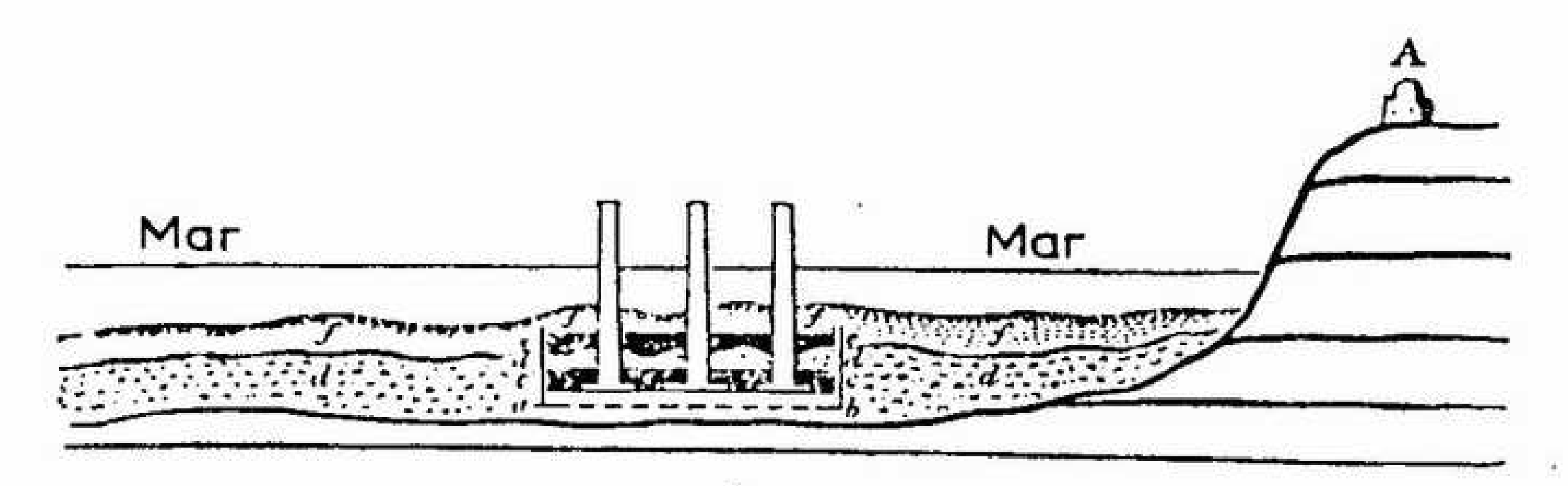


FIG. 3. Corte vertical del llamado Templo de Serapis en Pozzuoli, cerca de Nápoles. En él se ven las diversas capas que lo recubrieron, junto con su más profunda inundación, como lo atestiguan las perforaciones hechas por los organismos marinos en sus pilastras (de LYELL, 1875). *ab*) antiguo pavimento de mosaico. *cc*) incrustación marina oscura. *dd*) primer relleno de la lluvia de cenizas. *ee*) sedimento calcáreo de agua fresca. *ff*) segundo relleno. *A*) el Stadium.

uno y diez metros; ordinariamente los volcanes destruyen sólo una parte de sus alrededores en una sola erupción, y los seísmos más fuertes sólo llevan a la ruina a una zona muy limitada. Sólo a fuerza de repetirse continuamente, no durante cortos lapsos, como es el de siglos, sino durante miles y millones de años, llegan a adquirir dimensiones mundiales esas catástrofes, que si bien parecen enormes a nuestra escala humana, a escala geológica son casi inapreciables.

EL UNIFORMISMO Y SUS IMPLICACIONES PARA EL ORIGEN DE LA VIDA

En consecuencia, y dejando aparte consideraciones de orden filosófico, para fines prácticos podemos definir el actualismo o uniformismo como la tendencia a interpretar en Geología los pasados hechos de la historia de la Tierra a base de los mismos procesos que sabemos o suponemos que actúan hoy día en o sobre ella. Pero debemos afirmar explícitamente que la intensidad de semejantes procesos puede haber variado a lo largo de las épocas geológicas.

Saltan a la vista las consecuencias que implica el uniformismo para nuestra investigación sobre el origen de la vida en la Tierra. Buscamos causas naturales del mismo orden de las que operan actualmente. No contamos con acontecimientos repentinos, en virtud de los cuales apareciese la vida de golpe como algo perfectamente maduro en todos los rincones del Globo. El origen de la vida, medido a escala humana, tuvo que haber cubierto un lapso inmenso. Durante ese periodo, el desarrollo tuvo que ser de una lentitud casi inimaginable.

Pero dentro de esa lentitud, el origen de la vida pudo presentar infinitas variantes. Por cuanto sabemos, pudo haber diferentes series paralelas en ese desarrollo. Posiblemente sólo desembocaron en nuestra vida presente un escaso número de esas series, acaso incluso sólo una.

Dentro también de esa lentitud, el origen de la vida hubo de estar sometido a las mismas leyes físico-químicas que rigen sobre ella hoy día. Como veremos más adelante, es posible que nuestra atmósfera, ríos y océanos sean hoy totalmente distintos de lo que fueron en esas épocas remotas —en aquellos años primeros en que tuvo lugar la verdadera "lucha por la vida", la de su origen mismo—. Pero, aun suponiendo que el ambiente fuese completamente distinto, hasta el punto de que no lo reconoceríamos con nuestros criterios actuales, las leyes de la Naturaleza serían las mismas. Esto nos permite extrapolar los hallazgos de la microbiología y de la bioquímica de nuestros días a aquel pasado lejano, para orientarnos sobre el ambiente en que tuvo lugar el origen de la vida.

Al explorar los aspectos geológicos de su origen, hemos dado un gran avance. Hemos llegado a comprender cómo actúa

la Geología y cómo llega a sus conclusiones sobre acontecimientos inmensamente lejanos. Hemos encontrado que el principio básico del uniformismo forma el cimiento de los estudios geológicos, y sabemos cuáles son sus implicaciones. Al hacerlo, hemos quedado impresionados por las cantidades fabulosas de tiempo transcurrido desde los albores de la historia geológica. Ha llegado el momento de formarnos una idea de cómo mide la Geología estos espacios de tiempo y de las garantías que nos ofrecen esas mediciones. Así, pues, dedicaré el siguiente capítulo a estudiar esta faceta de los aspectos geológicos de la vida.

CAPITULO 3

Cómo se mide el tiempo en Geología

CALCULOS RELATIVOS Y ABSOLUTOS

La cronometría geológica es una ciencia joven —aun dentro de la Geología, que es una de las ciencias naturales más recientes—. El primer volumen extenso sobre este tema apareció hace dos decenios: fue el originalísimo *Dating the Past*, "Datación del pasado", del profesor ZEUNER, de Londres. El mismo título pudo haber servido de epígrafe a este capítulo. Al emplear otro, no ha sido por miedo al plagio, sino porque he querido sugerir el desarrollo vertiginoso que alcanzó en estos últimos veinte años la ciencia de medir el tiempo transcurrido a lo largo de las épocas geológicas.

El profesor ZEUNER estudió con suma atención los diversos métodos de medida del tiempo, tal como se conocían entonces. Pero, aparte del cómputo concreto de los años, como se hace, por ejemplo, en la dendrocronología, en que se examinan las capas que cría cada año un árbol en su tronco, o las que se constituyen en las así denominadas arcillas varvadas, que muestran también una continuidad anual de capas más gruesas y finas, los métodos que empleamos hoy día estaban entonces en mantillas. Estos métodos recientes se basan todos ellos en la desintegración radiactiva de diversos elementos naturales. Hace dos décadas estaban todavía en proceso de desarrollo. Sólo a base del avance conseguido en la posguerra en la instrumentación electrónica, pudieron alcanzar un valor práctico para la Geología.

Con todo, conviene subrayar que, incluso en tiempos tan recientes, el libro de ZEUNER representó un paso al centrar la atención sobre las posibilidades existentes para fijar la cronología real, para medir en años el tiempo transcurrido a partir de determinados fenómenos geológicos. Hasta entonces, prácticamente toda datación en Geología se continuaba ha-

ciendo por el método tradicional, que sólo permitía establecer edades relativas.

Claro que todo esto lo saben de memoria los geólogos. Pero precisamente por ser tan sabido y de uso tan diario, esta relatividad de la mayor parte de la cronología geológica no siempre queda debidamente destacada. Como en este libro no sólo nos interesan los hechos, sino la manera cómo se ha llegado a establecerlos, creo conveniente puntualizar la distinción entre el método corriente y ordinario de la computación geológica relativa y los medios que poseemos actualmente para medir el tiempo geológico en cantidades absolutas, en unidades, en millones o en miles de millones de años.

CRONOMETRIA RELATIVA

Debo subrayar nuevamente el hecho de que, al establecer la cronología del pasado, la Geología corriente de cada día sólo puede suministrar épocas relativas o comparativas. Los métodos empleados hoy día arrancan esencialmente de la época del agrimensor e ingeniero inglés WILLIAM SMITH (1769-1831). Se basan en dos principios fundamentales, a saber: el "principio de superposición", por una parte, y el de "la evolución de la fauna en los tiempos geológicos", por otra.

Principio de la superposición

El principio de la superposición establece sencillísimamente que en cualquier apilamiento de rocas sedimentarias cada capa se fue sedimentando sucesivamente sobre la inmediata anterior. De esa manera los estratos más recientes están superpuestos siempre a los más antiguos, de aquí el nombre que se dio a este principio. Así se puede asignar una edad relativa a las sucesivas capas rocosas de un terreno, como pueden encontrarse, por ejemplo, en un monte escarpado o en un pozo perforado. Si se halla la misma sucesión de estratos en otras laderas o en otros pozos, se puede establecer una correlación. Y así, si en esas localidades se descubren nuevas capas, o más antiguas por debajo de la serie conocida, o más recientes por encima de ella, entonces podrá incluso trazarse una cronología relativa de alcance local.

En algunas zonas se pueden seguir esas sedimentaciones sucesivas a lo largo de las laderas de las colinas en distancias larguísimas —por ejemplo, en las cuencas de Londres y París, que sirvieron, entre otras, de punto de partida para este sistema de determinación de edades—. Pero cualquier interrupción en esa serie de afloramientos, por ejemplo, un gran valle de aluvión, un lago o un océano, limita la aplicación de este procedimiento. Muchas veces resulta difícil y hasta imposible determinar cuál es la capa de uno de los lados de ese corte que corresponde exactamente a otra capa determinada al otro lado de la discontinuidad. Esto es cierto, aun tratándose de un corte tan estrecho como, por ejemplo, lo es el Canal de la Mancha. Los blancos acantilados calizos de Dover y de Cap Blanc Nez, que a primera vista parecen idénticos, muestran ya muchos detalles en su sucesión litológica que nos impiden seguir su correlación a través de la masa de agua interpuesta.

Evolución orgánica

Aquí es donde interviene la evolución orgánica, vegetal y animal. Los sedimentos depositados coetáneamente en la historia geológica pueden contener restos fosilizados de fauna y flora contemporáneas. Dado que la mayoría de los grupos de los organismos más desarrollados manifiestan una evolución a través del pasado geológico, en cualquier momento dado hubo formas concretas que vivieron sólo durante el periodo en cuestión. Si éstas se diferencian suficientemente tanto de sus antepasados como de sus descendientes, de forma que nos sea posible reconocerlas específicamente a base de sus fragmentos fosilizados, entonces la evolución orgánica suministra amablemente a los geólogos lo que llaman fósiles clave, fósiles "guía" o fósiles "característicos". Comparando dichos fósiles puede fijarse la edad comparativa de secciones de roca muy distanciadas. El hecho de que se use a menudo la expresión "evolución de la fauna" en este contexto, cuando en realidad se trata de la "evolución orgánica", tanto de la fauna como de la flora, se debe a la circunstancia de que abundan muchísimo más los fósiles clave procedentes de la fauna extinta que los de la flora desaparecida. Y esto a su vez obedece a la misma naturaleza del proceso de fosilización, que favorece mucho más

la preservación de partes reconocibles de animales que de plantas.

Así, la idea básica de utilizar la evolución orgánica para establecer la cronología del pasado geológico, aunque sólo sea de una manera relativa, resulta de una simplicidad muy sugestiva. Pero preguntará cualquiera que esté familiarizado con los geólogos o la Geología: entonces, ¿por qué existen divergencias de parecer entre los geólogos casi siempre que establecen comparaciones entre las épocas remotas? La razón es que, si bien la idea fundamental es sencilla, su aplicación está erizada de dificultades. Por una parte, a lo largo de los tiempos geológicos se repitieron ciertas líneas análogas de desarrollo en muchos grupos orgánicos, con lo que algunos de éstos pueden mostrar semejanzas notables con formas que no tuvieron relación directa con ellos y que vivieron en épocas muy anteriores o posteriores; pero además hay que tener en cuenta que la mayoría de los fósiles no aparecen en todos y cada uno de los sedimentos formados en un determinado intervalo de tiempo, ya que los seres vivos tienden a concentrarse en zonas propicias a su existencia. Además, muchos grupos orgánicos que evolucionaron con relativa rapidez y que, naturalmente, son los que suministran el mejor material para los fósiles clave, no se presentan en gran cantidad numérica de individuos y, por lo mismo, escasean sus restos fosilizados.

Eras geológicas de edad relativa

Estos detalles, sin embargo, no son óbice para comprender cómo logra la Geología la cronología del pasado. Podemos dejar confiadamente los detalles de la aplicación del principio de la evolución orgánica a los esfuerzos del estratígrafo y del paleontólogo, ya que ésa es su profesión y su misión. Baste decir que, gracias a la laboriosa aplicación de estos dos principios orientadores —superposición y evolución orgánica—, se ha podido reunir y estructurar un impresionante cúmulo de hechos que permiten graduar el pasado geológico dentro de una escala de tiempos relativos. Todas las divisiones del tiempo geológico de uso corriente, así como las eras principales —Paleozoico, Mesozoico, Neozoico o Cenozoico—, se basan en los cambios evolutivos de la vida o, para ser más exactos, en la evolución de la fauna. Esos mismos términos que acabo

de mencionar, y que dividen el pasado geológico en eras del mundo animal —antigua, media y nueva—, división comparable a la de la historia en antigua, media y moderna, indican por sí mismos que sus límites se fijaron a base de la fauna contemporánea, mientras que la flora antigua sólo desempeña un papel subordinado en la cronometría relativa de la Geología.

Más aún, siguiendo la misma pauta de la historia humana, también se distinguen en Geología periodos prehistóricos y protohistóricos, en los que es imposible fijar el tiempo a base de la evolución orgánica, igual que al tratar de la prehistoria y de la protohistoria humana no sirven los métodos históricos normales.

Como veremos, al buscar el origen de la vida sobre la Tierra acabaremos por vernos metidos en esas fases primeras de la historia geológica. Pero antes de continuar quiero volver a dejar bien sentado que toda la cronología normal de la Geología tiene sólo carácter relativo. Por ejemplo, nos informa de que las capas del Neozoico son mucho más recientes que las del Paleozoico. Pero a base únicamente de este método, nunca será posible hacer afirmaciones de este tipo: "El Mesozoico empezó hace tantos o cuantos millones de años." Todo cálculo en que se exprese un número concreto de años se basa en los métodos de la datación "absoluta", y no en los procedimientos, hasta ahora corrientes, de establecimiento de las edades relativas del pasado geológico.

Edad relativa de los sedimentos y de las rocas ígneas

Otro hecho tenemos que destacar en relación con esta cronometría relativa de las edades geológicas, y es que sólo puede aplicarse directamente a los sedimentos. Las rocas ígneas, formadas en la corteza por enfriamiento y solidificación gradual del magma fundido, no obedecen al principio de la superposición. El magma fundido tiende a romper a través de la corteza, desafiando así la ley de la superposición. Y aun en el caso en que proceda de un volcán y se derrame como lava sobre los sedimentos cercanos, siguiendo así el principio de la superposición, el magma no contiene organismos vivos. Y sin fósiles no es posible aplicar el segundo principio orientador, o sea el de la evolución orgánica. Así es que dentro de la

cronología geológica ordinaria, la edad de las rocas ígneas es doblemente relativa: sólo puede determinarse la edad relativa que tienen con respecto a la edad relativa de los sedimentos adyacentes. Las rocas ígneas son siempre más recientes que los sedimentos en los que penetraron. E inversamente, las rocas ígneas son más antiguas que los sedimentos que las cubren. Por consiguiente, la cronología geológica de las rocas ígneas es siempre relativa con respecto a la edad de los sedimentos, que ya de por sí es también relativa.

CRONOMETRIA O DATACION ABSOLUTA

En contraste con los métodos cronométricos relativos, empleados corrientemente en Geología, la cronometría absoluta mide el tiempo en años o en unidades mayores. Dos de los procedimientos usados en la cronometría absoluta miden de hecho el tiempo en años. Tales son la dendrocronología y el estudio de los estratos de arcilla y de otros depósitos estratificados. La dendrocronología cuenta los anillos que forman los árboles cada año al desarrollarse en sus crecimientos estacionales. También pueden contarse, en los estratos arcillosos, las capas periódicas de arcillas más finas y más bastas, depositadas durante el invierno y el verano frente a una capa de hielo. Este método se ha aplicado también con éxito, por ejemplo, a las capas anuales encontradas en ciertos yacimientos de sal gema. Pero tanto la técnica de la dendrocronología como la de los sedimentos estratificados sólo tienen aplicación dentro de lapsos máximos de hasta unas decenas de miles de años. Carecen en absoluto de valor para fechar el origen de la vida en la Tierra. Hace tanto tiempo que ocurrió esto, que para medirlo hemos de tomar como unidad base el millón y hasta el millar de millón de años.

Relojes físicos: series de desintegración radiactiva

Sólo es posible medir esos espacios de tiempo tan fabulosos mediante los "relojes físicos", basados en la continua descomposición radiactiva de determinados elementos naturales. Todos los elementos naturales más pesados son inestables, así como lo son también varios isótopos de los elementos más

ligeros. Su existencia actual se debe solamente a que su desintegración es tan lenta, que, en comparación con su plazo de descomposición, resulta corta la edad de la Tierra y de las rocas en las que se encuentran dichos elementos.

Un solo átomo de un isótopo radiactivo se desintegra por un proceso espontáneo, sin que se pueda predecir el momento en que va a ocurrir. Sólo cuando se presentan en gran número los átomos de un isótopo radiactivo entran en juego las leyes estadísticas para regir el proceso general de desintegración. Para cada isótopo radiactivo existe una probabilidad constante de que en un tiempo dado se desintegre una fracción fija. En este caso es posible determinar cómo disminuirán con el tiempo el número total de los átomos radiactivos de un isótopo dado. Como la desintegración de los átomos individuales es fortuita, el ritmo de descomposición es proporcional solamente al número de los átomos originarios. Esta constante de proporcionalidad ha sido denominada constante de desintegración. El ritmo de desintegración de un isótopo radiactivo se expresa ventajosamente a base de la mitad de su vida, que representa el tiempo en que se desintegra, hasta la mitad de su valor original, cualquier número de átomos de ese isótopo (Russel y Farquar, 1960).

Ritmo constante en la desintegración radiactiva

Todos los métodos en que se emplea la descomposición radiactiva para medir el tiempo de los periodos geológicos se apoyan en un presupuesto básico, a saber: que el ritmo de desintegración no varía ni siquiera en esos periodos larguísimos. Ahora bien, la Física teórica nos asegura que así es. Según la Física teórica, la desintegración radiactiva es un proceso nuclear innato a un núcleo atómico dado. A diferencia de la configuración de los electrones periféricos, que determinan las propiedades químicas de los átomos, la constitución nuclear no puede alterarse por influencias externas. Ni el calor ni el frío, ni la presión, ni los cambios en los campos eléctricos y magnéticos, todos los cuales sufrieron cambios dentro de ciertos límites reducidos durante la historia de la Tierra, influyen para nada en un proceso nuclear, como el de la desintegración radiactiva. La Física experimental confirma esta doctrina de la Física teórica, dentro de los límites de los

experimentos realizados hasta ahora. Pero los límites de la Geología no consisten en los extremos de calor o de frío, de gravedad o de magnetismo terrestre, ni siquiera de presiones enormemente fuertes. Hay un factor esencial que jamás podrá reproducirse en el laboratorio, y es la longitud interminable del tiempo consustancial a los procesos geológicos.

Preguntará algún geólogo: ¿Es lógico, está justificado extrapolar la doctrina de la Física nuclear —una ciencia que apenas cuenta con veinte años de existencia— a las épocas geológicas que duraron miles de millones de años?

Anillos policromáticos

La misma Geología nos proporciona una respuesta a esta pregunta en el fenómeno curioso de los anillos policromáticos

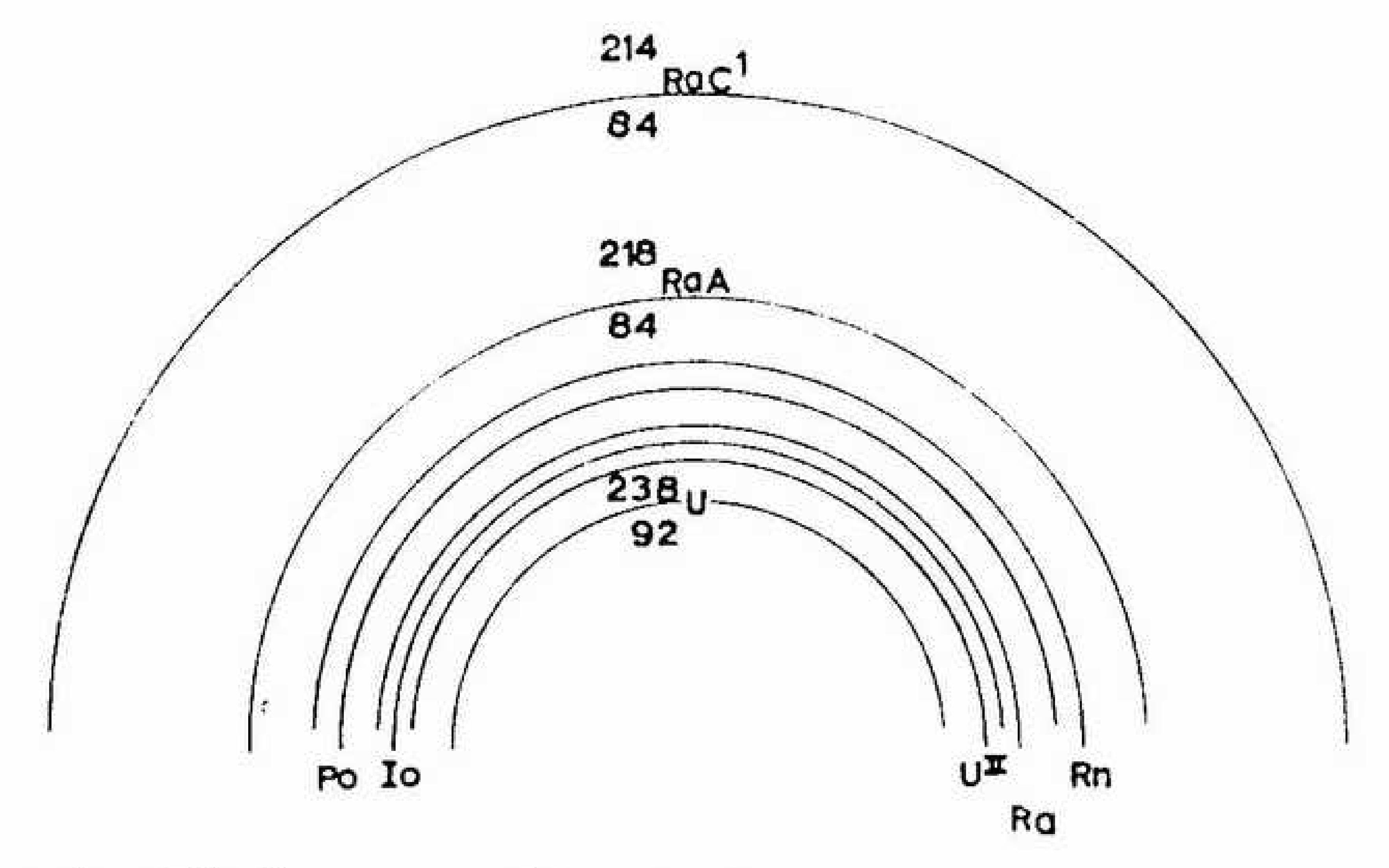


FIG. 4. Dibujo esquemático de los anillos *pl* pleocromáticos alrededor de una incrustación de uranio. En los minerales de formación rocosa normal el radio de la esfera exterior de RaC^1 es de unos 30 μ.

o pleocromáticos. Muchos minerales contienen puntos de coloración oscura, los cuales aparecen al microscopio como una serie de anillos concéntricos (Fig. 4).

A la luz polarizada, estos anillos muestran esquemas diferentes de color según el mineral que los origina, sobre todo

cuando se los hace girar bajo el microscopio polarizador; de aquí su nombre de anillos pleocromáticos. Estos anillos se deben a irregularidades en las redes del cristal del mineral envolvente. Y éstas, a su vez, se deben a varias emisiones producidas por las pequeñas inclusiones de elementos radiactivos en desintegración. Ahora bien, en un proceso desintegrante dado, la emanación que acompaña a la descomposición de determinado elemento radiactivo tiene siempre la misma energía, porque ésa es una propiedad nuclear consustancial al tipo de átomo que constituye ese elemento. Una emanación determinada penetra siempre la misma distancia en la red del cristal del mineral que contiene ese elemento, y forma una zona esférica de disrupción en torno a la incrustación radiactiva inserta en el mineral albergante. Si preparamos una fina sección o placa delgada de la roca, dicha esfera aparece, vista al microscopio, en forma de anillo o círculo perfecto, como es natural. Ahora bien, si suponemos que a lo largo de la vida de un mineral en el que hay incluida materia radiactiva hubiera variado la energía de sus emisiones, éstas no hubieran producido en el mineral esferas perturbadoras recortadas con tan neta definición. Cualquier cambio lento de energía en la desintegración radiactiva a lo largo de millones de años hubiese producido una mancha borrosa, en vez de anillos tan nítidos. Por tanto, al encontrar tantos anillos pleocromáticos, nítidamente recortados en muchos minerales, podemos tener la seguridad de que ciertamente no han cambiado las constantes de la desintegración radiactiva, ni siquiera a través de los periodos fabulosamente largos de la historia de la Geología.

Consiguientemente, es casi seguro que los relojes físicos montados sobre el principio de la desintegración de los elementos radiactivos naturales nos proporcionan una cronología absoluta; aunque no hay que incurrir en la presunción de que nos van a poder decir incluso el año. Esos relojes han marchado al mismo ritmo durante miles de millones de años, pero los métodos que poseemos para leerlos distan todavía mucho de la precisión y seguridad que puede lograrse en la Física de laboratorio. Tratándose de formaciones rocosas, nunca podemos tener la seguridad plena de que estamos midiendo realmente y con precisión los restos del mineral original, ni

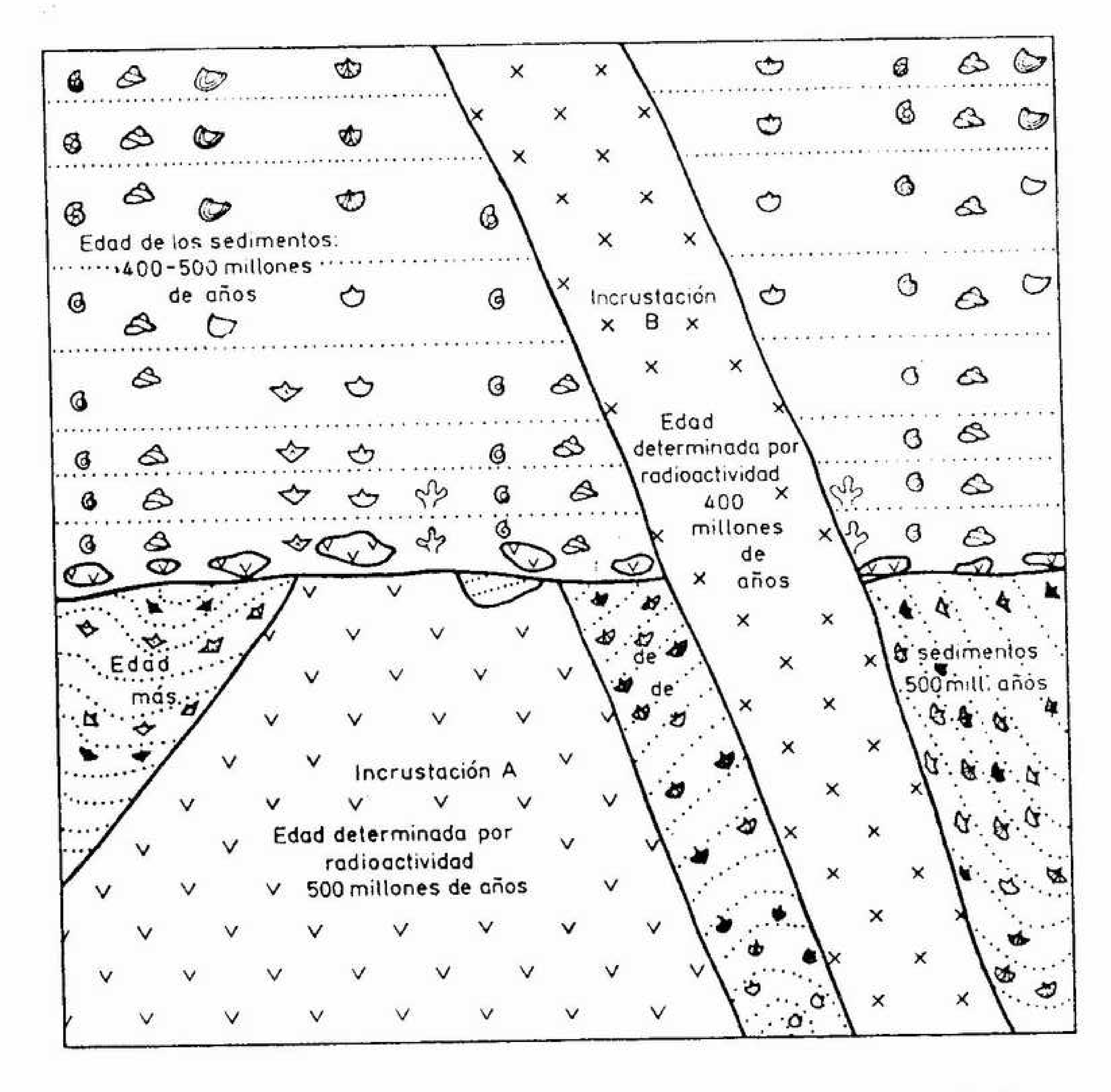


FIG. 5. Esquema de cronometría relativa y absoluta en Geología. Un apilamiento de sedimentos antiguos se ha plegado a lo largo de un proceso orogénico. Al final del mismo "intruye" un magma en los sedimentos, y constituye las rocas ígneas de intrusión *A*. Sigue luego la erosión y denudación de la corteza plegada, y sobre ella se va depositando una serie de nuevos sedimentos. Esta contiene en su base guijos de roca ígnea de la intrusión *A*, lo que denota que ésta es más antigua con relación a la serie, más reciente, de sedimentos. Más adelante fueron penetradas ambas rocas, antiguas y recientes, por un segundo magma. Puede establecerse localmente la edad relativa de los lechos de los sedimentos más jóvenes, observando el orden de superposición de cada lecho particular. Regionalmente puede establecerse la edad relativa mediante los fósiles guía o indicadores encontrados en esa serie. El mismo método puede aplicarse también a las series de sedimentos más antiguos. Aun en la serie plegada es posible distinguir las capas altas y las bajas, pues todavía contienen fósiles indicadores reconocibles, que no fueron borrados por el metamorfismo originado como consecuencia de la orogenia.
La edad relativa de la intrusión *A* es como sigue: *A* es más joven que la serie inferior de sedimentos y más antigua que la serie superpuesta. Para la edad relativa de la incrustación *B* diremos que es más joven que los sedimentos superiores y mucho más joven que los sedimentos inferiores.
Es posible fijar la edad absoluta de ambas intrusiones. Pero sólo puede fijarse de manera aproximada la edad absoluta de los sedimentos, como más antiguos o más recientes que las intrusiones datadas.

tampoco todos los átomos del último elemento estable producido de hecho por la desintegración radiactiva. Por consiguiente, al medir la edad de las rocas podemos contar con un error aproximado de un 5 por 100, aun haciéndolo a plena satisfacción. Este margen de error en una roca de un millar de millones de años supondría unos 50 millones de años de imprecisión en nuestros cálculos.

Lo que quiere decir que las técnicas de cronometría o datación absoluta no pueden reemplazar totalmente a los métodos geológicos tradicionales, que, como vimos, nos ponen en la pista del orden estratigráfico relativo de edad de rocas más antiguas con respecto a otras más recientes. Lo único que hacen es suministrarnos cierto número de posiciones fijas en las que encajar los datos relativos de la estratigrafía. En la cronometría geológica actual deben marchar de la mano ambos métodos, absoluto y relativo.

Edad absoluta de las rocas ígneas y sedimentos

Además, la cronometría absoluta de las rocas antiguas sólo puede aplicarse a las ígneas y derivadas, pero no a las de sedimentación. Con este método podemos establecer la fecha de nacimiento de determinada roca ígnea o de un mineral dado. Esto quiere decir que admitimos que la edad de una roca ígnea representa el tiempo transcurrido desde que cristalizó a partir del magma fundido en la corteza terrestre y, en el caso de una formación mineral, el tiempo transcurrido desde que se depositó procedente de emanaciones o soluciones en la vena de la mina en que fue encontrada. Tratándose de casos ideales, en ese momento geológico ciertos elementos radiactivos se incorporan a los minerales de las rocas eruptivas y de las venas minerales, y a partir de ese momento, los productos

degenerados de los elementos radiactivos, también bajo circunstancias ideales, quedan aprisionados y preservados dentro de la roca o de la vena en cuestión. Así es que, si medimos la cantidad que queda del elemento "madre" junto con la cantidad del elemento resultante generado por la desintegración de aquél y aplicamos la fórmula de la media vida, característica para ese proceso de desintegración, deducimos la "edad" de la roca o del criadero mineral.

Por otra parte, los sedimentos pueden contener cierta cantidad de productos de desintegración procedentes de ciclos radiactivos anteriores, que fueron arrastrados e incluidos en la capa sedimentaria al tiempo de formarse éste. Estos sólo pueden aprovecharse para la cronometría radiactiva cuando contienen minerales constituidos simultáneamente con el sedimento. Además, estos minerales "autigénicos" o de nueva formación deben contener elementos radiactivos incorporados a ellos. Un ejemplo —el único que se emplea actualmente— es el de la glauconia o glauconita (mineral). Es ésta un silicato complejo que contiene potasio. Presenta en su forma normal unos granos verdosos que cristalizaron en el fondo de mares calientes y someros, al parecer bajo cierta acción bioquímica que aún no se conoce bien. Con todo, sólo es posible fijar la edad de la glauconita tratándose de sedimentos jóvenes, de menos de 500 millones de años. No puede aplicarse a los periodos anteriores de la historia de la Tierra, en los que se sitúa el origen de la vida.

Por consiguiente, podemos afirmar que, tratándose de estos periodos más antiguos, sólo puede practicarse la cronometría absoluta con rocas ígneas y venas minerales, con exclusión de los sedimentos.

Las series de desintegración radiactiva en Geología

Actualmente se emplean cuatro procesos de desintegración radiactiva para el establecimiento de la edad de las rocas más antiguas. Han sido compendiados en la tabla I. Siguiendo el orden del número atómico ascendente del elemento original o generador, son: el método del potasio-argo, el de rubidio-estroncio, el de torio-plomo y el uranio-plomo. Estos dos últimos se usan siempre conjuntamente por tener el mismo elemento derivado estable, el plomo, aunque arranquen origina-

TABLA I

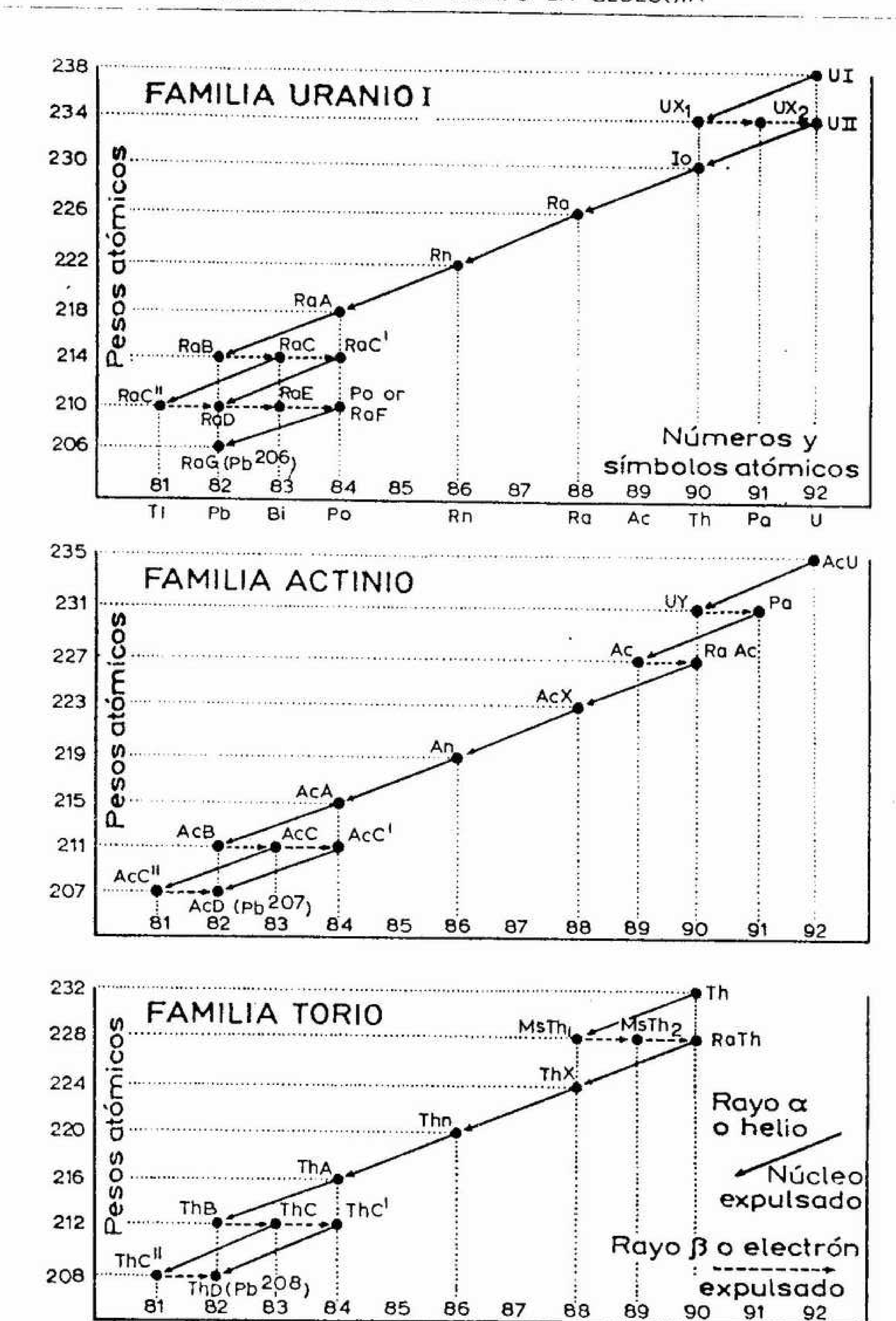
Procesos de desintegración de elementos naturales radiactivos empleados en la cronometría geológica absoluta

Elemento original	*Proceso de desintegración*	*Media vida*	*Isótopo estable final*
${}^{40}_{19}K$, potasio *	Captura de electrón	$12,4 \times 10^9$ años	${}^{40}_{18}A$, argo
${}^{87}_{37}Rb$, rubidio	Emisión de electrón o rayo beta	50×10^9 años	${}^{87}_{38}Sr$, estroncio
${}^{232}_{92}Th$, torio	Múltiples pasos intermedios (Compárese con la figura 5)	$13,9 \times 10^9$ años	${}^{208}_{82}Pb$, plomo
${}^{235}_{92}U$, uranio		$0,7 \times 10^9$ años	${}^{207}_{82}Pb$, plomo
${}^{238}_{92}U$, uranio		$4,5 \times 10^9$ años	${}^{206}_{82}Pb$, plomo

* El número superior —40— designa el peso atómico.
El número inferior —19— designa el número atómico.
La letra mayúscula —K— designa el símbolo atómico.

riamente de tres elementos radiactivos generadores diferentes, como son el torio y dos isótopos distintos del uranio, y aunque sus procesos degenerativos sean muy diferentes. Aun con la diferencia de que los tres producen un isótopo distinto del plomo, como puede apreciarse en la tabla I. En este hecho se basa el refinamiento moderno de este método de cronometría absoluta.

De estos diversos métodos, los más antiguos son los del uranio-plomo y torio-plomo. Sólo después de la II Guerra Mundial, y gracias a unos instrumentos más perfectos, como son, por ejemplo, los espectrógrafos y espectrómetros de mayor precisión y garantía, se desarrollaron técnicas a propósito para medir las otras series de desintegración, apare de que se han mejorado inmensamente los métodos del plomo.



Isótopos

Antes de la II Guerra Mundial, para que una muestra mineral pudiera servir para determinar la edad absoluta, debía contener grandes cantidades de uranio, torio y plomo. Se analizaba el contenido de uranio, torio y plomo de muestras tales como la pechblenda, que es un mineral de uranio complejísimo y en parte amorfo. De los ritmos de desintegración respectivos de las serie del uranio y del torio se calculaba el porcentaje del plomo allí contenido, que debía atribuirse a la desintegración del uranio y del torio, respectivamente. Suponiendo que todo el plomo allí encerrado procedía solamente de esos procesos de desintegración, podía ser "establecida" la edad de la muestra en cuestión aplicando la fórmula de la media vida de ambos minerales generadores.

Está claro que esto apenas tenía sentido, entre otras razones, porque el plomo contiene también un isótopo nada radiogénico, que es el ^{204}Pb, además de los isótopos radiogénicos ^{206}Pb, ^{207}Pb y ^{208}Pb, que son el producto final de la desintegración del uranio y del torio.

Naturalmente que ya entonces se tenía conciencia de la falibilidad de este supuesto. Pero una aproximación, aunque sea un poco a bulto, es mejor que la falta total de idea. Así es que se empleaba este método por la sencilla razón de que no se conocía otro mejor. Los trabajos posteriores han puesto de manifiesto que la mayoría de las mediciones primeras daban muy lejos del blanco; pero entonces cumplían con una finalidad concreta: la de dar una visión más o menos borrosa y fidedigna de la duración asombrosa de los tiempos geológicos. Esta comprobación tuvo ya importancia capital en los albores de la cronometría absoluta. Los geólogos, físicos y astrónomos pusieron de relieve una y mil veces la conclusión a que habían llegado, según la cual las edades de la Tierra y del Universo tuvieron que ser inconcebiblemente largas. Ahí estaban para afirmarlo las primeras mediciones de la edad de las rocas, de materiales palpables y que realmente eran viejísimos.

FIG. 6. Indice de desintegración de las series de uranio, actinio y torio de elementos radiactivos naturales (de HOLMES, 1937).

Espectrometría de masas

Dada la importancia que tiene la cronometría absoluta para valorar el ambiente en que se originó la vida en la Tierra, estimo conveniente explicar con alguna mayor amplitud el funcionamiento de la espectrometría de masas. Muchos lectores desearán conocer más exactamente la base de estos sistemas de cronometría absoluta, que pueden cubrir periodos tan fantásticos de tiempo. El lector a quien no interese este aspecto un tanto más técnico del proceso puede saltar las páginas siguientes y reanudar la narración en las observaciones finales de este capítulo. Pero en este caso ha de aceptar el valor atribuido a esas dataciones, aunque sienta cierta sombra de duda acerca de tales afirmaciones.

Como indiqué anteriormente, el instrumento básico que se usa hoy día en la cronometría absoluta es el espectrógrafo o el espectrómetro de masas. Mediante él se separan los átomos individuales según su masa o peso atómico. En una muestra dada permite detectar las cantidades relativas de los átomos de diferentes masas, o sea, obtener el espectro de masas atómicas. La diferencia entre estos dos tipos de instrumento reside en que en un espectrógrafo de masas los átomos de distinto peso inciden en diferentes puntos de una placa fotográfica, mientras que en el espectrómetro pasan por las rendijas colimadoras, y son contadas separadamente por un mecanismo electrónico. En el espectrógrafo se miden las cantidades relativas de los varios isótopos por la intensidad de las manchas oscuras que producen sobre la placa fotográfica. Fundamentalmente, pues, ambos instrumentos son parecidísimos, sólo que el espectrómetro de masas es mucho más sensible.

Son muchos los textos que describen los métodos espectrométricos de masas. En este estudio voy a seguir la exposición, tan nítida, que hacen RUSSELL y FARQUAR (1960). Los espectrómetros de masa se emplean principalmente para distinguir los varios isótopos de un mismo elemento y, en sentido más general, para diferenciar las diversas clases de átomos de propiedades muy afines entre sí. Repetiré expresamente una vez más que los isótopos de un elemento poseen propiedades químicas idénticas; de forma que cada elemento está formado conjuntamente por todos los átomos de sus varios

isótopos, cuya única diferencia reside en su peso atómico. Pero su número atómico y sus electrones periféricos, que es lo que determina sus propiedades químicas, son idénticos.

Sin embargo, debido a esa diferencia mínima en peso atómico, los isótopos de un elemento manifiestan ciertas diferencias pequeñísimas en sus propiedades físicas, como temperatura y presión de sus puntos de ebullición, etc., si bien la mayoría de estas diferencias son demasiado pequeñas para servir de base con que determinar con seguridad cuantitativa las cantidades relativas de isótopos.

La mejor técnica en uso hoy día consiste en la desviación que experimentan las partículas cargadas eléctricamente al hacerlas pasar por un campo magnético. Esas partículas, que en este caso son átomos o iones individuales de los isótopos que se trata de estudiar, cargados eléctricamente, quedan sujetas a la acción de una fuerza perpendicular al campo magnético y a su propia trayectoria y proporcional a su masa respectiva. En un campo magnético uniforme los iones de masa idéntica que fluyen perpendicularmente a dicho campo con la misma velocidad describen un recorrido circular.

En la práctica se hace pasar un haz de iones de diferentes masas a través de un tubo de vacío perfecto, en dirección perpendicular a la de un campo magnético constante y uniforme. Al entrar en el tubo se acelera a los iones mediante un campo V eléctrico de alta potencia, que les comunica a todos la misma energía $1/2\ mv^2$. Su trayectoria a través del tubo presentará ligeras diferencias de radio, que se relacionan con su masa mediante la fórmula

$$m = e \cdot \frac{R^2 B^2}{2V},$$

en que: m=masa atómica; e=carga eléctrica del ion; R=radio de la trayectoria del ion a través del tubo de alto vacío, y B=fuerza del campo magnético. El equipo electrónico va contando el número de iones de diferente masa que, después de describir trayectorias ligeramente divergentes, caen en la rendija colimadora instalada en el extremo del tubo.

Como mejor funcionan los espectrómetros de masa es a base de mezclas de vapor. Las muestras de plomo o de cualquier otro elemento cuya composición isotópica relativa desee

averiguarse se introducen en forma de compuesto químico gaseoso, convenientemente ionizado. Pasan, a través de un pequeño orificio, al gran vacío del instrumento propiamente dicho al mismo tiempo que se los acelera mediante un campo eléctrico de alto potencial.

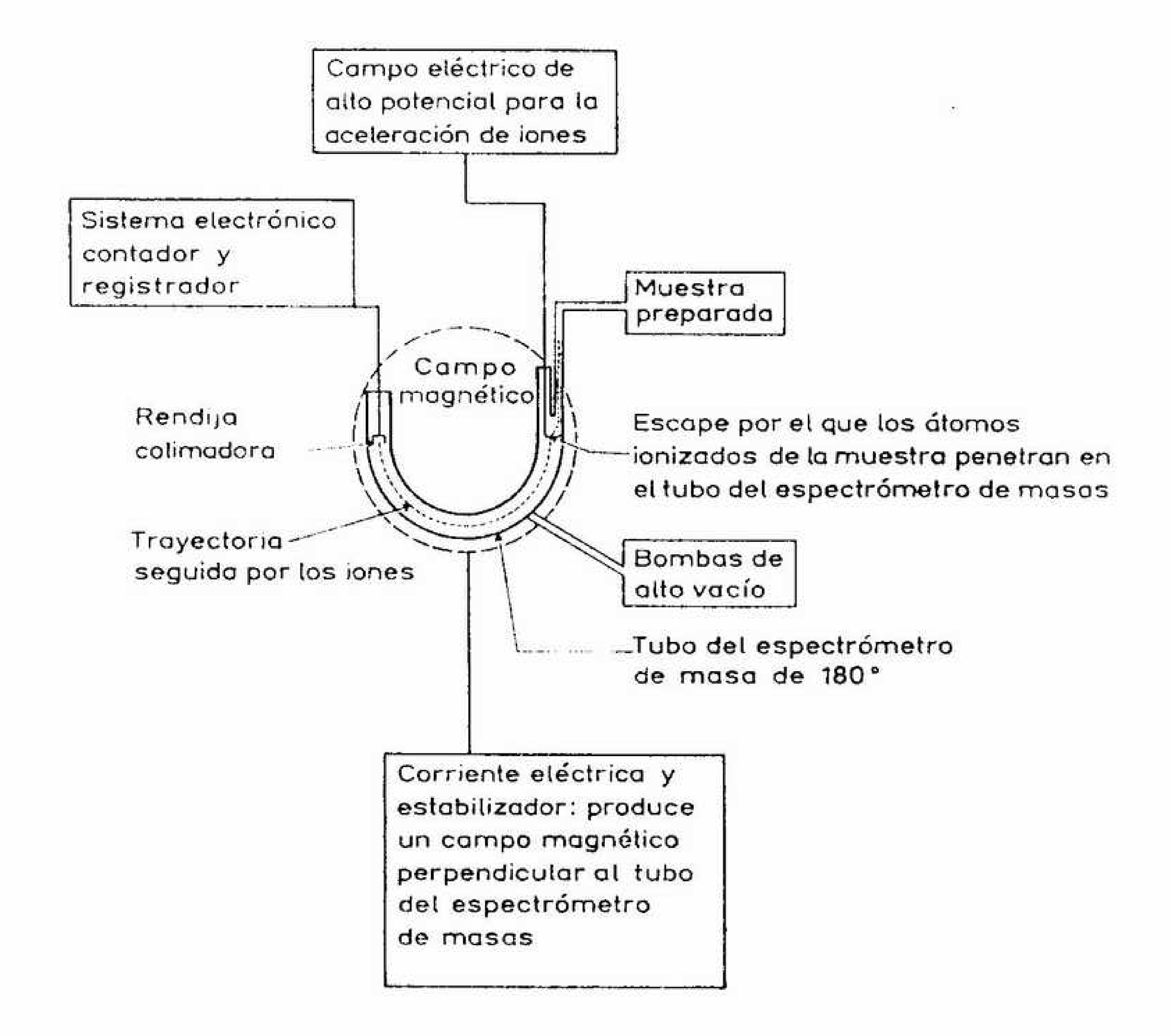


FIG. 7. Diagrama de un espectrómetro de masa de gases a 180°.

La figura 7 muestra un esquema básico de la construcción de un espectrómetro de masas. Dicho aparato consta de tres unidades. Al principio está el sistema para manipular la muestra. Es un instrumento puramente químico que sirve para purificarlas, enriquecerlas y convertirlas en un compuesto gaseoso apropiado para la espectrometría de masas. Sigue luego el tubo del instrumento propiamente dicho, que con frecuencia es pequeño en comparación con las otras partes accesorias.

Al extremo del tubo se encuentra el pesado equipo electrónico que va contando los electrones separados, los cuales, o bien caen en una serie de ranuras colimadoras, o bien se reúnen sobre una sola situada en la extremidad del tubo de alto vacío, mediante las convenientes variaciones de la fuerza del campo magnético. Estas cuentas quedan amplificadas y registradas de forma que representan la respuesta que da el espectrómetro de masa, sin que se precise ninguna operación ulterior.

Dilución de los isótopos

En contraste con los pobres métodos anteriores a la II Guerra Mundial, que eran de índole predominantemente química, apreciamos que la espectrometría de masas aprovecha las diferencias físicas de los núcleos de los diversos isótopos para la determinación directa de sus proporciones. Hoy día se puede prescindir, muchas veces por completo, de los análisis químicos determinantes de la abundancia relativa o absoluta de los elementos primarios y derivados en las series de la desintegración atómica. Se emplea como técnica la dilución del isótopo, la cual se incorporó originalmente a la problemática geológica en el procedimiento cronométrico rubidio-estroncio. En este método se mezcla la muestra en cuestión con diversas cantidades pequeñas del mismo elemento, de proporciones isotópicas conocidas. Las variaciones del índice isotópico que resultan de la mezcla, y que registra el espectrómetro de masa, permiten calcular el índice isotópico de la muestra original. Por medio de reactores atómicos se producen corrientemente muestras de elementos de composición isotópica uniforme, dispuestas así para servir en la cronometría geológica absoluta.

El empleo de la dilución isotópica en la espectrometría de masas ha representado un gran avance en la cronometría absoluta. En vez de las torpes y laboriosas técnicas químicas, de los análisis cuantitativos de los elementos generadores y derivados, en los que incluso las muestras más pequeñas están compuestas de un número grandísimo de átomos, ahora sólo son necesarios un par de análisis espectrométricos de masas. Actualmente las muestras pueden ser muchísimo más pequeñas que las requeridas para el análisis químico, ya que el espectrómetro de masas cuenta cada átomo de la muestra

analizada. En circunstancias ideales, hoy día se puede fijar la edad disponiendo de cantidades de un microorganismo, que es una millonésima de gramo.

En consecuencia, es así como la espectrometría de masas ha hecho posible el empleo de la desintegración del rubidio-estroncio y del potasio-argón para la cronometría absoluta. Además, imprimió nuevo impulso al método del plomo. Hoy día se pueden medir por separado las cantidades que contiene un mineral de uranio, de ^{232}torio-^{208}plomo, de ^{235}uranio-^{207}plomo, de ^{238}uranio-^{206}plomo. Más aún, se puede comprobar la cantidad de estos tres isótopos radiogénicos del plomo respecto a las cantidades de ^{204}plomo no radiogénicas, contenidas en la misma muestra. Esto, sin embargo, requiere todavía la comprobación química de las cantidades de torio, uranio y plomo totales. Pero utilizando las, así denominadas, dataciones de plomo-plomo, derivadas de cocientes por el estilo de

$$\frac{^{206}Pb}{^{207}Pb},$$

puede llegarse a determinar la edad sin tener en cuenta la cantidad total del elemento original.

Esto es muy importante porque de esa manera puede comprobarse independientemente la posible pérdida de determinados elementos durante la desintegración radiactiva. Los dos uranios y el torio presentan en sus series de desintegración fases gaseosas intermedias, como el gas radón, que pueden escapar fácilmente a lo largo de los periodos geológicos. Además, el producto "estable" final, los isótopos derivados del plomo, no resultan tan estables en la corteza terrestre; antes bien, tienden a segregarse en cualquier otro lado por la acción de diversos procesos a lo largo de millones de años. Midiendo los diversos cocientes de los isótopos del plomo se puede comprobar la cantidad de pérdida del plomo radiogénico y de otros componentes. Sólo se puede contar con la probabilidad de que no haya habido lugar a pérdidas serias en los productos radiogénicos cuando convergen todos los valores determinados por los diferentes métodos del plomo. En este caso la así denominada "edad concordante del plomo" queda probada y aceptado el método como un método cronométrico de tanta garantía como los de las otras series de desintegración.

Garantía de la cronometría absoluta

Resumiendo esta digresión acerca de los procedimientos de determinación de la edad absoluta, se ve que las técnicas han alcanzado avances prodigiosos en estos últimos decenios. Además, los científicos dedicados hoy día a esta labor se esfuerzan por echar mano de todas las técnicas posibles para fijar la edad de cualquier muestra. Gracias a las cantidades pequeñísimas que se requieren actualmente de los elementos presentes, se puede fijar la edad de la mayoría de las rocas, aunque sólo contengan cantidades insignificantes de dichos elementos, a base del método potasio-argón y rubidio-estroncio, así como por los diversos procedimientos del plomo. Consiguientemente, es frecuente encontrar hoy día una datación de una roca determinada, resultado de la colaboración de diez o más autores. Unos responden de la localización y selección geológica; otros, de la preparación química, mientras que el resto es responsable de las medidas isotópicas requeridas por los diversos métodos de determinación de edad. Más aún, a menudo se verifican comprobaciones entre los diversos laboratorios sobre distintas porciones de una misma muestra con objeto de asegurar la capacidad de reproducción de las medidas, como garantía de las mismas.

Si echamos ahora una mirada a los resultados, es naturalísimo que cualquier persona no familiarizada con la cronometría absoluta quede desconcertada ante la magnitud de las cifras resultantes. Se habla de épocas de millones de años —y de miles de millones—, y si bien parece natural desconfiar de semejantes afirmaciones y poner en duda su valor, es posible que esa actitud recelosa derive de las muchas veces en que han resultado erróneos los cálculos absolutos en el pasado. Y no sólo han experimentado muchos de esos cálculos de edades absolutas muy sustanciales correcciones, sino que éstas se han producido casi siempre en el sentido de ampliar más y más el número de años. De aquí que se sacase la impresión, al parecer con toda lógica, de que cada año que estos científicos nucleares investigaban la edad de la Tierra, ésta aumentaba en un par de millones de años.

En cierto modo, esa tendencia a aumentar de día en día la edad de nuestro Globo daba a veces la impresión de puro

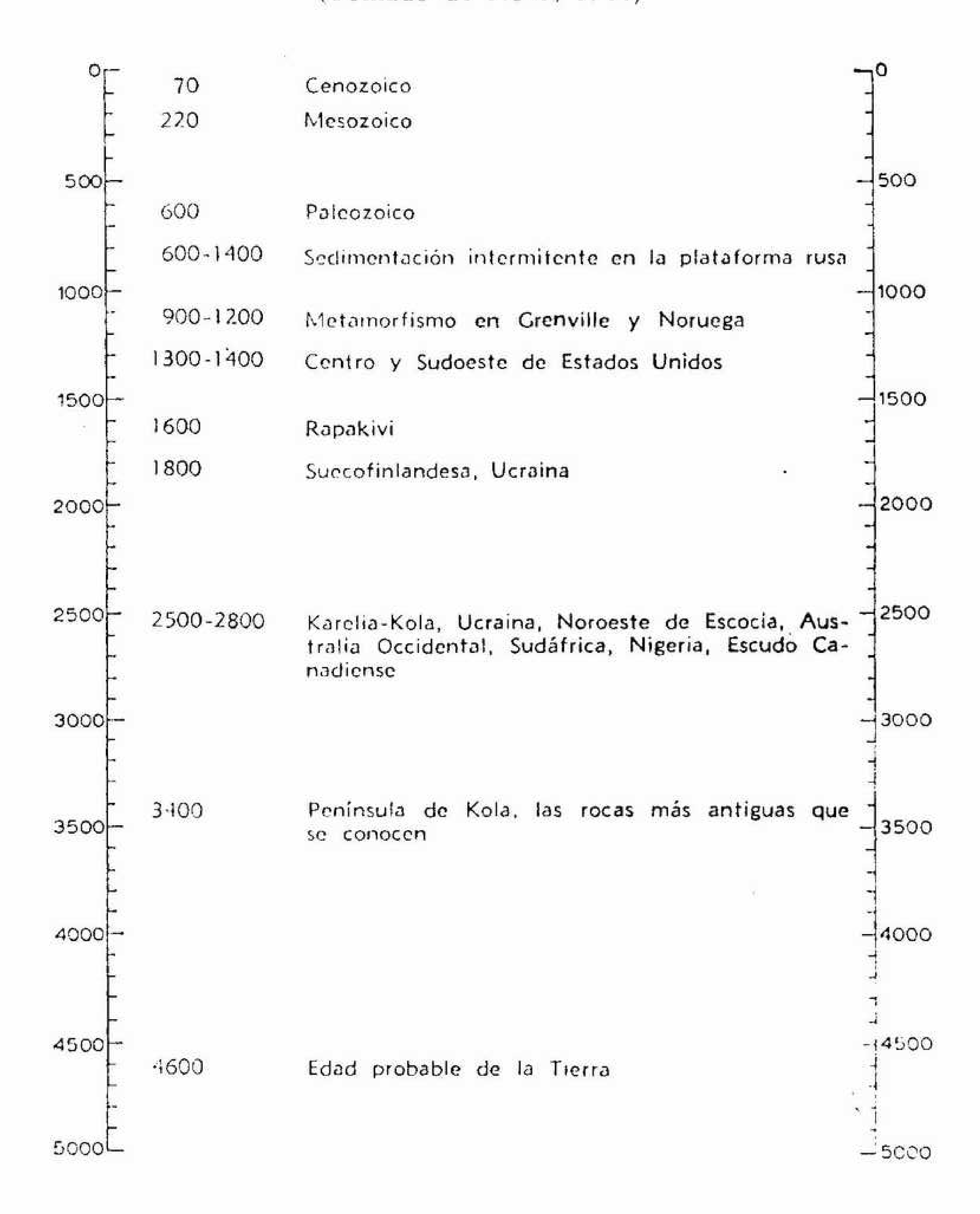
TABLA II

Cronología geológica "normal": edad y duración de las eras y sistemas —o épocas— desde los comienzos del Paleozoico
(Tomado de KULP, 1960)

Era	Periodo	Epoca	Comienzo de la época en millones de años
CENOZOICO	Cuaternario	Pleistoceno	1
	Terciario	Plioceno	12
		Mioceno	23
		Oligoceno	35
		Eoceno	55
		Paleoceno	70
MESOZOICO	Cretácico	Sup.er (Base del Santonense)	90
		Medio (Base del Albense)	120
		Inferior	135
	Jurásico	Sup.er (Base del Callovense)	150
		Medio (Base del Bajocense)	170
		Inferior	180
	Triásico	Superior	200
		Medio	
		Inferior	220
PALEOZOICO	Pérmico	Superior (Base del Ochoano)	235
		Medio (Base del Guadalupense)	250
		Inferior	270
	Carbonífero: Pennsylvaniense	Sup.er (Base del Missouriense)	
		Medio (Base del Desmoinesense)	
		Inferior (Base del Namurense)	320
	Carbonífero: Mississippiense	Superior	
		Medio	
		Inferior	350
	Devónico	Superior	365
		Medio	380
		Inferior	400
	Silúrico	Superior	
		Medio	
		Inferior	430
	Ordovícico	Superior	
		Medio	
		Inferior	490
	Cámbrico	Superior (Base del Croixense)	510
		Medio	540
		Inferior	(600)

TABLA III

Cronología geológica: fechas de los principales acontecimientos desde el origen de la Tierra (en millones de años)
(Tomado de KULP, 1960)



70	Cenozoico
220	Mesozoico
600	Paleozoico
600-1400	Sedimentación intermitente en la plataforma rusa
900-1200	Metamorfismo en Grenville y Noruega
1300-1400	Centro y Sudoeste de Estados Unidos
1600	Rapakivi
1800	Suecofinlandesa, Ucraina
2500-2800	Karelia-Kola, Ucraina, Noroeste de Escocia, Australia Occidental, Sudáfrica, Nigeria, Escudo Canadiense
3400	Península de Kola, las rocas más antiguas que se conocen
4600	Edad probable de la Tierra

farol. Me propongo hacer ver que la cronometría absoluta en Geología no tiene nada de presunción ni es cuestión de conjeturas. No sólo se basa en cantidad de leyes físicas auténticas, sino que existen diversas técnicas paralelas con las que se pueden contrastar los resultados independientemente.

Por otra parte, debemos admitir que estas técnicas son aún difíciles de aplicar. Primero, porque requieren la máxima perfección de los instrumentos electrónicos actuales; y segundo, porque las rocas que forman hoy día la corteza de la Tierra y que contienen en su interior los relojes físicos que hemos de manejar estuvieron expuestas, naturalmente, a toda clase de vicisitudes durante las largas épocas de su historia geológica.

Pero, prescindiendo de estos detalles, podemos llegar a la conclusión, en líneas generales, de que debemos confiar en las dataciones absolutas de dichas rocas como constituyentes de la aproximación más cercana a la realidad que hoy día somos capaces de obtener.

LA LARGA HISTORIA PRIMITIVA DE LA TIERRA

El resultado más general de la cronometría absoluta ha sido el de darnos conciencia acerca de la duración inmensa de la primitiva historia de la Tierra, esa parte de su historia tan pobremente documentada. Sólo cuando la vida sobre nuestro planeta desarrolló formas con partes duras, tales como los esqueletos, se hizo posible una fosilización abundante. Esta empezó, más o menos simultáneamente, en cierto número de diferentes especies zoológicas al principio del periodo cambriano. Es éste el primero de la Era Paleozoica, y todo geólogo que haya manejado fósiles tiene la sensación de que en ese tiempo se produjo en la historia de la Tierra un corte tajante. Tenemos luego la historia posterior de nuestro planeta, desde el Sistema Cambriano en adelante, en que pueden calcularse cómodamente las dataciones de los hallazgos a base de fósiles; y ahí tenemos también el periodo precambriano, vago, anterior al cambriano, casi carente de fósiles.

Este corte o discontinuidad que ocurrió en los albores del Sistema Cambriano, se calcula en la actualidad que ocurrió hace unos 600 millones de años. Pero la roca más antigua

de la corteza de la Tierra examinada hasta ahora, mediante la cronometría radiactiva, ha dado 3 300 millones de años de edad.

Así, todas las épocas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico juntas, con sus 600 millones de años de existencia, duran menos de la quinta parte del tiempo durante el cual había desarrollado ya nuestra Tierra una corteza exterior más o menos parecida a la que tiene actualmente.

En un momento dado de esa tempranísima época de la historia de la Tierra apareció la vida.

Las tablas II y III presentan una cronología geológica reciente —Kulp, 1960—, en las que se expresa claramente la diferencia entre la historia geológica "normal" y la primitiva. El primer cuadro presenta las edades y la duración de las eras y sistemas desde el comienzo del Paleozoico, en que abundaron los fósiles en mayor o menor cantidad. El segundo cuadro contiene toda la cronometría antigua y, por lo mismo, concentra directamente la atención en la larga duración de la historia geológica primitiva y, en concreto, del periodo precambriano.

También las figuras 35 y 36 muestran claramente esa diferencia. La figura 35 representa esquemáticamente el desarrollo de la vida en la Tierra durante estos últimos 600 millones de años. La figura 36 presenta, en forma más esquemática, la distinción entre la época del origen de la vida en la Tierra, hace unos dos mil millones de años, y su desarrollo ulterior a partir del comienzo del Sistema Cambriano y de la Era Paleozoica.

Enfoque biológico

SIMPOSIO DE LA UNION INTERNACIONAL DE BIOQUIMICA EN MOSCU

En los capítulos precedentes vimos cuán hondas son las raíces que tiene en Geología la filosofía uniformista y cómo, en líneas generales, acepta la Geología la extrapolación de procesos actuales al pasado geológico, aun tratándose de lapsos de millones y de miles de millones de años. Consiguientemente, debemos analizar ahora los resultados de los estudios biológicos sobre la vida realizados en nuestros días y el significado que pueden tener para explicar el origen de la vida. Hemos de averiguar qué es lo que caracteriza la vida hoy día: qué es lo que llamamos vivo y qué es lo que consideramos muerto; qué procesos concretos se producen en los seres vivos de nuestro tiempo o, dicho en otras palabras, qué metabolismo desarrollan las formas vitales contemporáneas.

Los biólogos interesados en el origen de la vida nos han proporcionado un resumen muy valioso del estado de su ciencia —junto con algunas aportaciones de la Astronomía y de la Geología— en las memorias del Simposio de la Unión Internacional de Bioquímica, celebrado en Moscú en 1957. Dichas actas fueron editadas originalmente por OPARIN, PASYNSKI, BRAUNSHTEIN y PAVLOVSKAYA; luego aparecieron en una versión inglés-francés-alemán, editada por CLARK y SYNGE, como volumen I de I.U.B. Symposium Series, en 1959, bajo el título de *The Origin of Life on Earth* (OPARIN, 1959). Posteriormente vio la luz un compendio que contenía algunas ponencias selectas, pero sin las discusiones (editado por FLORKIN, 1960), bajo el título de *Aspects of the Origin of Life*. Las siguientes afirmaciones las he sacado principalmente de estos compendios: contienen un resumen del punto de vista biológico sobre este problema, en la medida en que es necesario para llegar a comprender sus aspectos geológicos.

LO VIVIENTE Y LO NO VIVIENTE EN BIOLOGIA

Una de las dificultades principales con que tienen que enfrentarse los biólogos es la distinción final entre lo vivo y lo muerto. Claro que la dificultad no es tan grande tratándose de los organismos más conocidos, como el hombre, y los animales y plantas más desarrollados. Nadie se plantea la duda de si la persona cuya defunción aparece en las columnas de nuestros periódicos estará realmente muerta o viva. Donde realmente se presenta la dificultad para distinguir lo vivo de lo no vivo es cuando nos hallamos frente a los estratos más rudimentarios de la materia viva; reside en la dificultad de distinguir entre los organismos ínfimos, unicelulares o no celulares, pero vivientes, por una parte, y por la otra, las moléculas gigantes, pero no vivientes; la dificultad de diferenciar entre sistemas sumamente simples de metabolismo y reproducción, parecidísimos a las reacciones químicas, y otras reacciones químicas complicadas entre moléculas enormes, que, sin embargo, han de considerarse como no vivientes.

En estos casos marginales es imposible establecer una definición categórica entre el ser vivo y el no vivo, más bien que el muerto. Por ejemplo, incluso el hecho de que todos los seres vivos contengan proteínas y de que parte de su metabolismo se base en un ciclo proteínico no basta para proporcionarnos una definición tajante, aunque, por supuesto, sirve de base para una fácil esquematización. La propiedad que posee la materia viva de contener proteínas puede ayudar al geólogo a formarse una característica descriptiva bastante segura de la vida en la Tierra, pero no basta para eliminar otras posibilidades. Podemos imaginar posibles formas de vida no basadas en proteínas. O, lo que es mucho más importante, podemos figurarnos la formación de proteínas por modos inorgánicos, por lo menos en circunstancias suficientemente diferentes del ambiente natural actual de la Tierra.

Pero esa distinción entre lo vivo y lo no vivo, tan importante para el biólogo, requiere un conocimiento de mil detalles mucho más menudos que los que podrán resolver jamás los hechos de observación geológica. El geólogo nunca ve la vida que nos describe. El sólo encuentra sus restos, no sólo muertos, sino fosilizados. Esto significa que hasta la materia del

antiguo organismo viviente ha sido sustituida por piedra o mineral. Cuando esa sustitución se ha realizado ordenadamente, molécula a molécula, puede preservarse la estructura en sus más menudos detalles microscópicos. Esto es a lo más que puede aspirar el geólogo por regla general, siendo extremadamente raro encontrar actualmente una sustancia orgánica en estado de preservación.

Claro que también el biólogo, particularmente el bioquímico, utiliza normalmente partes de organismos muertos, células muertas, y hasta extractos de células disociadas expresamente mediante técnicas de laboratorio. El que estudia la vida en restos muertos se parece en cierto modo al borracho que sabe que ha perdido la llave en su portal, pero que se va a buscarla bajo el poste de la luz porque allí puede ver mejor (WINKLER, 1960). Pero, aun cuando el biólogo estudia la vida en restos muertos, fue él mismo quien la mató un momento antes, utilizando para ello técnicas que él conoce y que selecciona para deformar el original vivo lo menos posible.

LO VIVIENTE Y LO NO VIVIENTE EN GEOLOGIA

Hemos de dejar sentado con toda claridad que los instrumentos de que se sirve la Geología son muchísimo menos finos; hasta tal punto, que para nosotros esa distinción entre vivos y muertos resulta en la práctica una cuestión totalmente bizantina. Lo más que podemos esperar es encontrar restos fosilizados de organismos que vivieron sobre la Tierra anteriormente. Rarísimas veces podemos formarnos alguna ligera idea acerca de cómo murieron esas formas —por ejemplo, al quedar enterradas por cenizas volcánicas o al caer en un yacimiento de asfalto—. Pero no se trata solamente de que, en general, desconocemos cómo murieron estos futuros fósiles; es que además sólo tenemos ideas vaguísimas sobre cómo y por qué quedaron preservados y sobre cómo y cuándo tuvo lugar el proceso de fosilización, esa sustitución del material orgánico original por materia mineral. Aparte de los restos fosilizados propiamente dichos, podemos estudiar también, como una pista adicional, el cuadro ambiental que dominaba en el área en que quedaron enterrados esos restos en la roca, y a base de ellos, conjeturar el ambiente en que vivieron los

organismos que después quedaron preservados al estado de fósiles.

Para que se los pueda reconocer como restos de organismos anteriormente vivos, es preciso que los fósiles hayan conservado alguna forma o estructura claramente orgánica, reconocible a simple vista, con una lupa o con la ayuda de un microscopio normal. Esos restos de antiguos organismos vivos, relictos del pasado geológico, no sólo están muertos, sino bien muertos y fosilizados desde hace mucho tiempo. Ya no pueden suministrarnos esas preparaciones frescas que estudian los biólogos bajo el microscopio electrónico, ni los extractos que preparan en sus ultracentrifugadoras. Repitámoslo una vez más, nuestros ejemplares están muertos y fosilizados.

Los organismos que el geólogo es capaz de encontrar en estado fósil después de miles de millones de años pueden muy bien pertenecer a los organismos más "bajos", a formas unicelulares, como bacterias y ciertas algas; en una palabra, al mundo de los microbios. Pero la organización de semejantes formas ha avanzado ya mucho en su trayectoria desde aquella zona intermedia entre el ser vivo y no vivo, que tanto interesa al biólogo. Los restos fosilizados de la historia primitiva de la vida deben mostrar ya alguna estructura celular. Apenas puede caber la duda de que esos restos proceden de organismos enteramente vivos, y no de una forma de protovida, indecisa o marginal.

UNIFORMIDAD QUIMICA EN EL DESARROLLO DE LA VIDA ACTUAL

Volviendo de nuevo a los estudios biológicos sobre la vida actual, encontramos en ella como rasgo saliente la antítesis que se ofrece entre la inmensa variedad de su expresión morfológica y el reducido número de reacciones químicas que le sirven de base. Desde un punto de vista morfológico, la vida ofrece una gama infinita de formas, especies, géneros, familias y mundos sistemáticos altamente desarrollados de microbios, plantas y animales. Se calcula que pululan hoy día en nuestro planeta como un millón de especies diferentes. Contrastando con esta variedad, desde el punto de vista bioquímico, tenemos que la vida actual, con todo su lujo de variedades, se basa totalmente en ácidos nucléicos, proteínas, carbohidratos,

grasas y algunos otros compuestos menores, como ésteres fosfóricos. Aunque estos compuestos presentan grandes variaciones de detalle, están todos ellos relacionados entre sí y se forman a base de solamente unas pocas decenas de reacciones bioquímicas fundamentales. Las plantas y animales del mar, desde las más minúsculas especies de plancton que derivan a merced de las corrientes hasta los inmensos ballenatos, y todas las plantas y animales continentales, desde los virus hasta los elefantes, lo mismo los aerobios como los anaerobios, todos se basan en este número asombrosamente reducido de compuestos orgánicos.

Se ha dicho que la Naturaleza está organizada de forma que todo ser viviente forma parte de la cadena alimentaria y puede alimentarse de otros organismos vivos. Debido al escaso número de compuestos orgánicos empleados en la construcción de cualquier forma de vida, siempre existe en cualquier organismo algo que pueden digerir otros organismos. Esto es algo que los científicos encuentran divertido. En esa afinidad bioquímica ven un indicio de que todas las formas actuales de vida guardan entre sí alguna relación y que, por consiguiente, tienen un origen común.

Los compuestos químicos con que se construyen todas las formas de vida existentes forman conjuntamente los compuestos de la química orgánica natural, en contraposición a la química inorgánica. Y, sin embargo, sólo constituyen una parte muy pequeña de los compuestos orgánicos que pueden sintetizarse a base de esos mismos elementos. O, dicho en lenguaje teleológico, la Naturaleza fue de una estrechez mental extremada en sus concepciones químicas. Cualquier químico puede hacer hoy día compuestos orgánicos en muchísima mayor variedad y número que los que formó la madre Naturaleza a lo largo de unos dos mil millones de años.

Si examinamos ahora más de cerca ese grupo de compuestos orgánicos naturales: proteínas, carbohidratos, grasas y algunos más, vemos que están constituidos principalmente por los cuatro elementos C, O, H y N. Algunos de estos compuestos, en especial las proteínas, forman moléculas gigantes de estructura complicada. Hoy día se está en vías de descifrar la estructura de esas moléculas orgánicas gigantes. Tanto en la literatura científica como en la popular abundan los ensayos y estudios sobre este tema. Pero no es preciso que nosotros los abordemos aquí; basta recoger, de esos estudios biológicos sobre la vida actual, el hecho de que la mayoría de los compuestos orgánicos naturales están formados por moléculas tan grandes como complicadas.

EN LA ATMOSFERA ACTUAL NO ES POSIBLE LA SINTESIS NATURAL DE LOS COMPUESTOS ORGANICOS

Este hecho tiene una importancia decisiva para apreciar la posibilidad del origen de la vida, ya que puede considerarse prácticamente imposible, en las actuales circunstancias ambientales, la síntesis de esas moléculas gigantes y complicadas a base de procesos inorgánicos naturales. Dadas las condiciones actuales de temperatura, luz, composición de la atmósfera y de la hidrosfera, sólo son estables algunas moléculas mucho más pequeñas formadas de esos mismos elementos, mientras que los demás compuestos orgánicos de mayor tamaño resultan inestables. Y si, por una rarísima coincidencia, llegara a formarse alguna molécula orgánica semejante, quedaría destruida al punto, o por oxidación inorgánica, o por oxidación orgánica, tal como la putrefacción. Es decir, que hoy día esas moléculas orgánicas gigantes no pueden existir independiente e inorgánicamente, totalmente al margen de los organismos vivos. Tampoco puede formarlas ordinaria —ni siquiera extraordinariamente— la Química inorgánica natural, y aun dado el caso de que pudiera hacerlo, estarían abocadas a inmediata destrucción.

Con las afirmaciones precedentes sólo quiero parafrasear el gran abismo que separa actualmente en la Naturaleza los compuestos químicos orgánicos de los inorgánicos; un abismo tan inmenso, que hasta que se logró tender un puente, en 1827, mediante la síntesis de la urea, parecía como si ni siquiera el hombre, con su química artificial, fuera capaz de producir jamás esas moléculas orgánicas, proceso que parecía reservado exclusivamente al metabolismo de los seres vivos.

Debemos, pues, darnos cuenta de que hoy día no hay manera posible de que se formen en la Naturaleza compuestos orgánicos, si no es por los procesos mismos que desarrolla la materia viva ya existente. De ello se deduce que es imposible

el origen de la vida a partir de elementos inorgánicos en las condiciones actuales, por la sencilla razón de que sólo la materia viva puede sintetizar a su vez compuestos orgánicos. Sólo la materia viviente puede producir otra materia viva.

ATMOSFERA OXIGENICA DE LOS TIEMPOS PRESENTES

Pero el punto crucial no reside, sin embargo, en el hecho de la completa imposibilidad de semejante origen, sino sólo en el hecho de que sea imposible en las circunstancias actuales. El factor más esencial de dichas circunstancias es que todas las condiciones ambientales de vida en la Tierra se basan, en la actualidad, en el hecho de que hoy día la atmósfera contiene una cantidad apreciable de oxígeno libre.

El oxígeno libre de nuestra atmósfera, así como el oxígeno libre disuelto en la mayor parte de nuestra hidrosfera, hace posible la respiración de la mayoría de las plantas y animales. Esta es la parte más importante de su ciclo energético, y en ese sentido, legitima las alusiones poéticas al oxígeno "vivificador". Pero este oxígeno libre atmosférico presenta otro aspecto importante. Aunque este aspecto no es tan fácilmente perceptible en nuestra vida diaria como la respiración, sin embargo, tiene la misma o acaso mayor trascendencia. Ese aspecto consiste en que en las zonas más elevadas de la atmósfera el oxígeno libre forma una capa relativamente delgada de ozono. El ozono absorbe la mayor parte de la luz ultravioleta que emite el Sol y, consiguientemente, nos defiende de los efectos de dichos rayos. Una dosis pequeña de los rayos ultravioleta de mayor longitud puede ser tolerada por el organismo y hasta puede producir un saludable bronceado solar; pero los rayos ultravioleta, en toda la extensión de su espectro y con la intensidad con que el Sol los emite, son más mortíferos para la vida actual en la Tierra que cualquier radiación producida por desintegración radiactiva.

De los dos efectos que produce el oxígeno libre de la atmósfera —posibilidad de respirar y defensa contra los rayos ultravioleta—, sólo el segundo constituye una *conditio sine qua non* para la vida actual de la Tierra. Conocemos una amplia gama de microbios anaerobios que presentan una gran variedad de ciclos metabólicos en los que no interviene para

nada el oxígeno libre; es más, para la mayor parte de ellos resulta fatal. Y como nuestra atmósfera contiene oxígeno libre en grandes cantidades, esos microbios sólo pueden vivir cuando se los aísla tan perfectamente de la atmósfera que sean capaces de reducir las pequeñas cantidades de oxígeno que pueda llegarles. Así es que hoy día existen en la Tierra formas de vida que viven y se propagan por exclusión del oxígeno libre.

Sin embargo, tanto las formas aerobias como las anaerobias morirían víctimas de los rayos ultravioleta cortos si no los filtrase la capa de ozono de las zonas altas de la atmósfera. Pero esa capa depende a su vez de la presencia del oxígeno libre existente en nuestra atmósfera. Por consiguiente, si faltase ese oxígeno libre atmosférico, hasta los organismos anaerobios que nosotros conocemos actualmente se verían apurados para sobrevivir, no porque sus procesos metabólicos no pudieran adaptarse a una atmósfera de esa índole, sino porque los matarían los rayos ultravioleta, que entonces incidirían directamente sobre la superficie de la Tierra. Sólo protegidos por el agua o los suelos —como ocurre en lagos y océanos o entre los poros del suelo— podrían tener probabilidades de sobrevivir a tal ambiente formas de vida similares a la de los microbios anaerobios actuales.

PRIMITIVA ATMOSFERA ANOXIGENICA

Todas las teorías actuales sobre el origen natural de la vida en la Tierra —procedentes todas ellas de las ideas originales de OPARIN— postulan una atmósfera primitiva o temprana de carácter reductor, carente de oxígeno libre.

Por entonces el oxígeno debió existir solamente bajo forma de compuestos químicos, el más importante de los cuales debió ser el agua. Esa atmósfera primitiva y, por supuesto, también la hidrosfera primitiva, los ríos, lagos y océanos de aquellas épocas debieron contener, además del agua, carbono y nitrógeno, en su mayor parte también como compuestos, además de una serie de otros elementos. Entre éstos debieron tener importancia capital, como catalizadores en los ciclos energéticos primitivos, el azufre y el fósforo. La diferencia entre esa atmósfera y la de hoy día reside en el hecho de que

en aquellos tiempos primitivos aquélla no pudo contener una cantidad apreciable de oxígeno libre.

Hay variedad de opiniones entre los diferentes autores acerca de la abundancia relativa de los elementos y de sus compuestos en la atmósfera y en la hidrosfera primitivas. Aludiendo a la mezcla de agua con esos otros componentes de la primitiva hidrosfera, se la denomina con frecuencia el "caldo claro", con lo que se elude la necesidad de calcular su composición con demasiado rigor.

SINTESIS INORGANICAS DE COMPUESTOS "ORGANICOS" EN LA ATMOSFERA PRIMITIVA

Lo que importa realmente no es la composición exacta de la atmósfera e hidrosfera primitivas, sino la falta en ellas de oxígeno libre y la presencia consiguiente de compuestos relativamente sencillos de los elementos C, O, H, N, S y P, que hoy día sólo se presentan como compuestos orgánicos naturales, acompañando otros compuestos, como CO_2, H_2O, SiO_2, silicatos, sulfatos y otros parecidos, que ahora pertenecen también a la Química inorgánica natural.

La posibilidad de la presencia de esos compuestos es el resultado directo, por doble línea, de la existencia de una atmósfera primitiva carente de oxígeno libre. Primero, en una atmósfera de tal índole, esos compuestos, que actualmente sólo pueden formarse por vía natural mediante el metabolismo de la materia viva, pueden construirse por procesos de Química inorgánica. Y no sólo pueden construirse regularmente en semejante atmósfera, sino que además son estables o, por lo menos, tan estables como para no quedar destruidos a un ritmo comparable al de su formación. Esto se debe también al carácter reductor de una atmósfera sin oxígeno libre, en la que no se dan los procesos actuales de oxidación y descomposición.

Pero analicemos un poco más a fondo la razón de por qué en una atmósfera primitiva de ese tipo, es decir, anoxigénica o sin oxígeno libre, es posible que se formen compuestos sencillos "orgánicos" por procesos naturales de Química inorgánica. Esta posibilidad es el resultado directo de la falta de la capa protectora de ozono, procedente del oxígeno libre en las altas regiones de la atmósfera. En ese caso no hay ozono para filtrar la luz ultravioleta de onda corta, así es que ésta puede llegar libremente a la superficie terrestre. Esa luz de onda tan corta desarrolla una energía altísima, que, como vimos, mataría hoy día la vida con su radiación de tan elevado potencial: ése sería uno de sus resultados. Otro sería, por el contrario, favorecer, gracias precisamente a esa fuerte energía, en la superficie terrestre reacciones fotoquímicas inorgánicas que no se dan hoy día debido a que la luz solar que penetra por la capa de ozono no posee una energía suficientemente alta. Las radiaciones solares ultravioleta de onda más corta son, en realidad, tan ricas en energía que pueden provocar en varios elementos del "caldo claro" la formación de ligazones químicas; es decir, que pueden formar compuestos moleculares mediante la absorción de cuantos de luz. Este es un proceso absolutamente inorgánico, pero que, sin embargo, en esas circunstancias puede formar moléculas típicamente "orgánicas", hasta aminoácidos inclusive.

Es proceso que depende de la absorción de cuantos de luz procedentes de los rayos ultravioleta cortos: un proceso de fotosíntesis, pero de fotosíntesis inorgánica. No debe confundirse con la fotosíntesis orgánica, que se desarrolla actualmente en las plantas por la acción catalítica de la clorofila y mediante la absorción principalmente de cuantos de luz de la zona roja de la luz solar.

GENERACION ESPONTANEA

En la bibliografía se llama a veces *generatio spontanea* a esta síntesis inorgánica de compuestos "orgánicos". Durante mucho tiempo fue ésa una expresión muy socorrida para designar cualquier origen vital incomprendido que no era posible estudiar, o que se parecía algo, o que, al contrario, era completamente opuesto a la Creación. Ahora que la Ciencia está estudiando intensamente los posibles modos del origen de la vida en la Tierra mediante la acción de causas naturales, parece preferible relegar totalmente al olvido la expresión *generatio spontanea.*

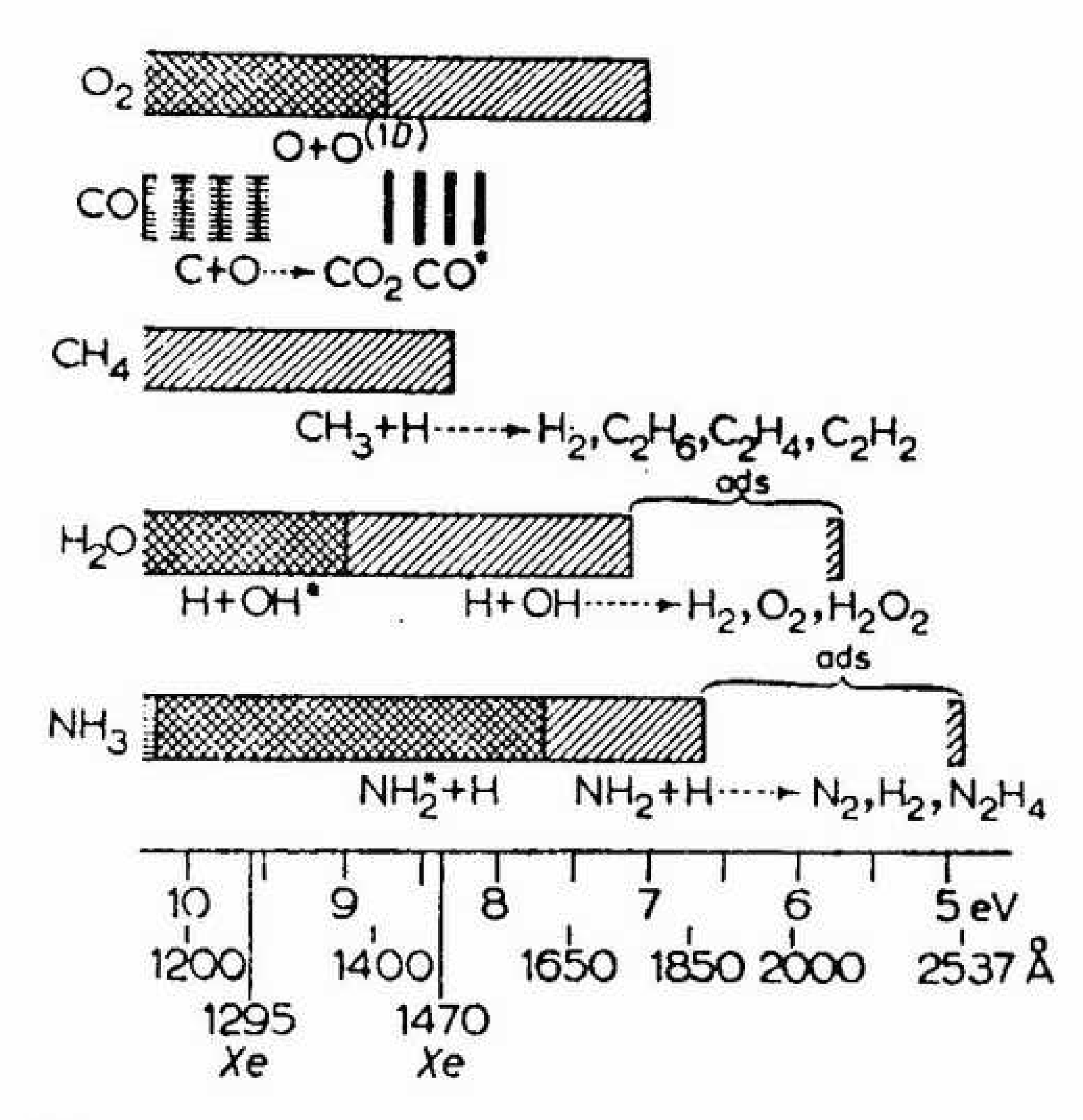


FIG. 8. Alcances espectrales de sensibilidad fotoquímica para gases (de A. N. TERENIN, 1959). Se ve cómo el oxígeno absorbe la luz ultravioleta de una longuitud de onda de 1 850 Å o menor. Los valores de energía de los correspondientes cuantos de luz, expresados en electronvoltios, suben desde unos 7 eV por luz de 1 800 Å hasta 10 eV por luz de 1 200 Å. En esta zona los otros gases mencionados son fotoquímicamente activos, como indican el rayado y contrarrayado. Los asteriscos indican la longitud de onda a la que empiezan a emitir luz los radicales en cuestión, fenómeno que no tiene importancia para la síntesis de las moléculas grandes, pero sí para reconocerlas durante el experimento. Las flechas punteadas indican las zonas espectrales en que se integran las moléculas compuestas, formadas por átomos y radicales. Las dos líneas xenón de 1 295 Å y de 1 470 Å indican las fuertes radiaciones monocromáticas de la lámpara de xenón, que utilizó GROTH en experimentos de esta índole ya en 1938.

COMPROBACIONES EXPERIMENTALES

La figura 8 —tomada de la reciente compilación de TERENIN, 1959— sirve para ilustrar la importancia teórica que tienen los rayos ultravioleta cortos de la luz solar —de una longitud de onda por debajo de 1 850 Å— para los procesos de fotosíntesis inorgánica de gases sencillos estables como CO, CH_4, H_2O y NH_3. El resultado de los estudios experimentales

de las zonas de adsorción, en que puede producirse la actividad fotoquímica, precisamente de esos gases que pudieron componer la atmósfera primitiva y que constituirían los elementos básicos de cualquier molécula "orgánica" primaria, demuestra que coinciden con la del oxígeno libre y con la de los productos de su disociación y del ozono. Por consiguiente, la atmósfera presente es opaca a la luz ultracorta, absorbida por la zona de ozono en las altas capas de aquélla. En cambio, el hidrógeno es completamente transparente a la luz de esa longitud de onda; por tanto, en una atmósfera compuesta principalmente de hidrógeno, esos rayos de luz solar podían penetrar a través de ella hasta la superficie de la Tierra.

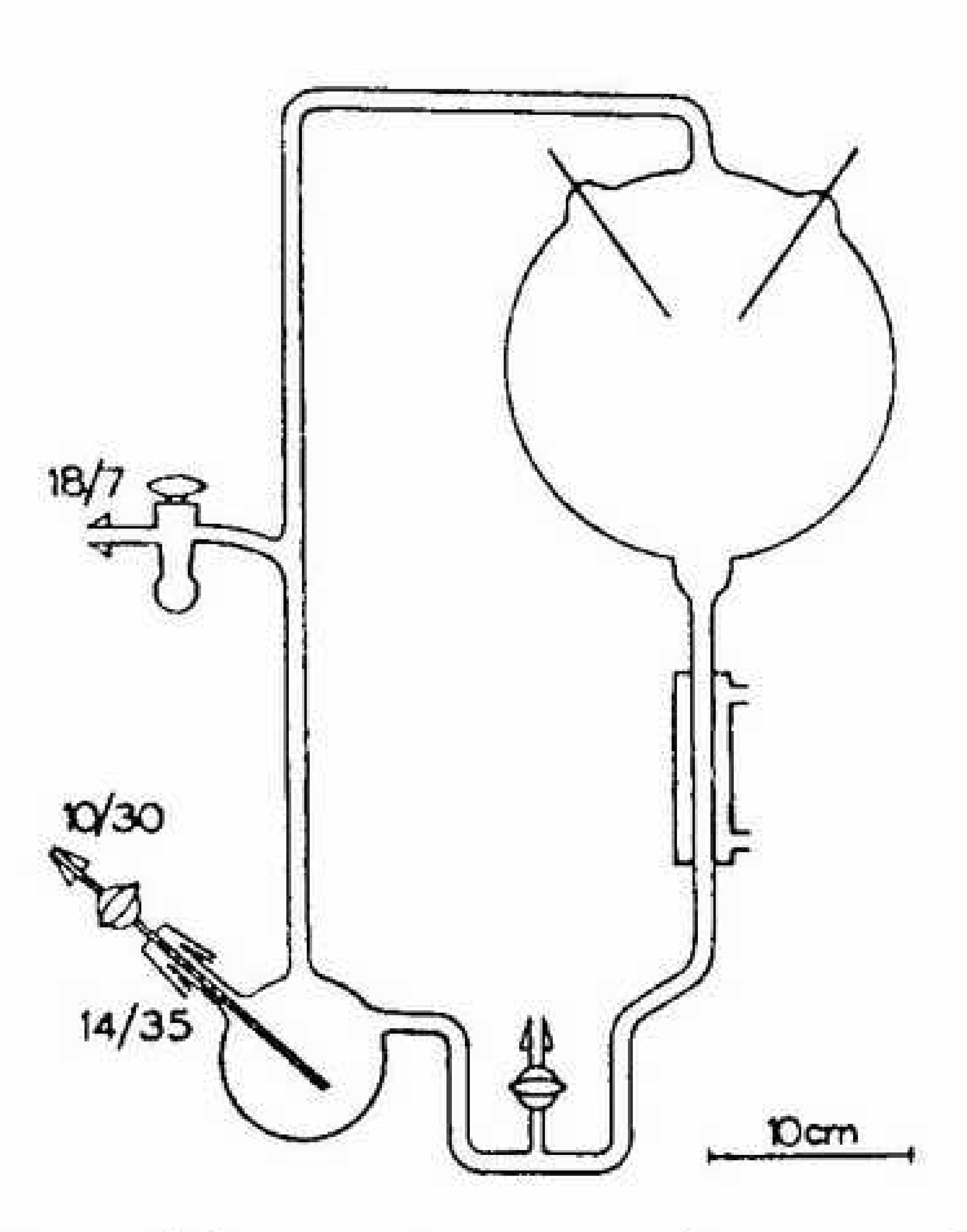


FIG. 9. Diagrama del aparato para descarga de chispas, empleado para producir compuestos "orgánicos" de hidrógeno, metano, amoniaco y agua en ambiente anoxigénico (de S. L. MILLER, 1959).

No es ésta una posibilidad puramente teórica: se ha demostrado experimentalmente en los últimos años que al mezclarse los gases, tal como indica la figura 8, pueden producir muchos compuestos "orgánicos" diferentes, tratándolos con agua en recipientes de cristal y sometiéndolos a fuertes descargas eléctricas o a la irradiación de rayos ultravioleta cortos, sin más requisito previo que la ausencia de oxígeno libre.

Los experimentos más conocidos son los de MILLER —1959-1960—, que logró producir aminoácidos por ese procedimiento. Además, WILSON —1960— comunicó recientemente en una memoria que en circunstancias análogas podían formarse también moléculas mucho mayores.

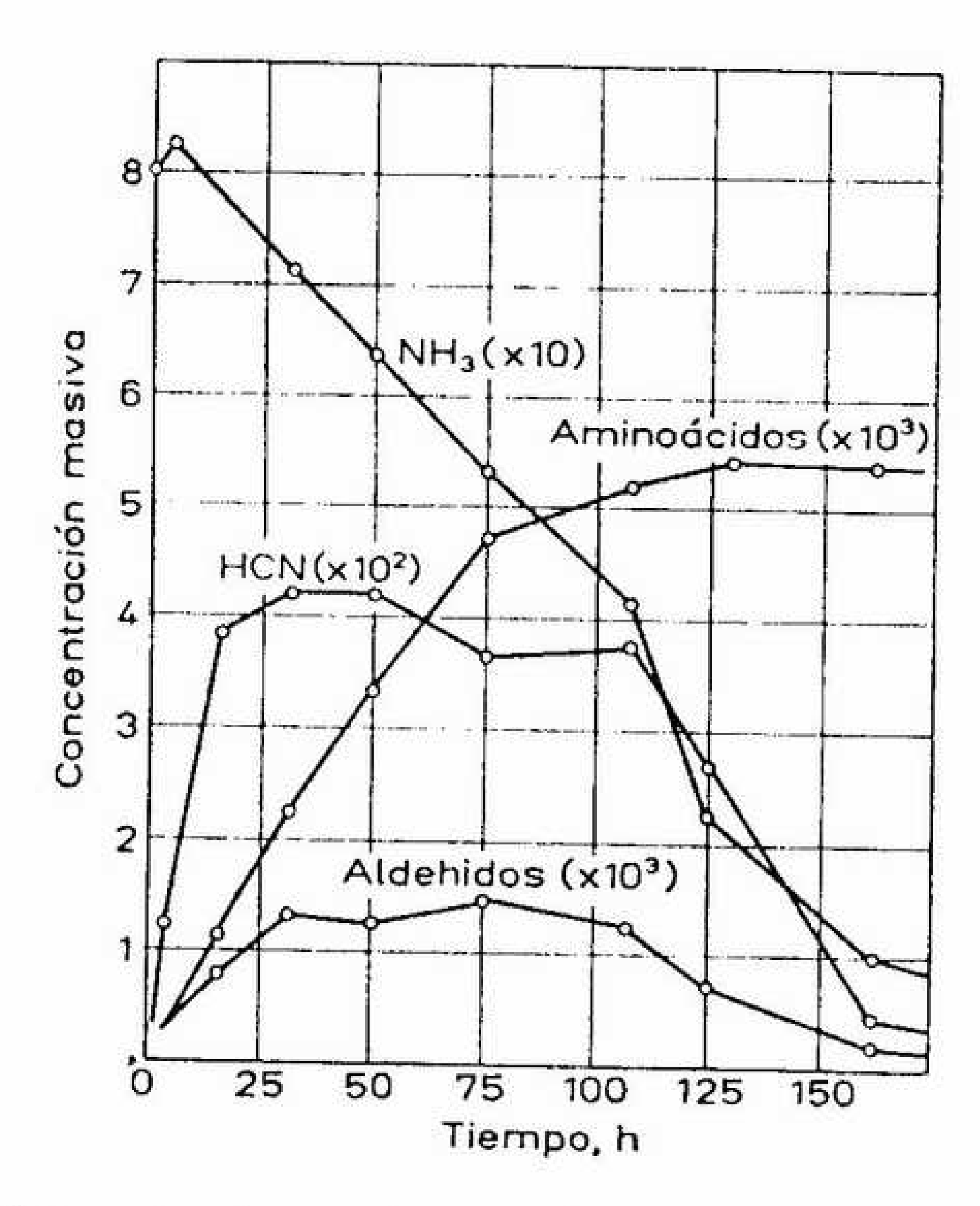


FIG. 10. Concentraciones de amoniaco, cianuro de hidrógeno y aldehidos en el tubo *U*, y aminoácidos en el frasco de 500 ml, mientras se somete a las chispas una mezcla de metano, amoniaco, agua e hidrógeno en el aparato de la figura 9 (de S. L. MILLER, 1959).

En la figura 9 ofrecemos un dibujo esquemático del aparato que utilizó MILLER para la descarga eléctrica. Estas descargas se usan por comodidad. Desarrollan una energía inferior a la que puede obtenerse con irradiación de luz ultravioleta corta, pero presentan menos dificultades experimentales. El pequeño frasco representado en el ángulo inferior izquierdo contiene agua, mientras que el resto del sistema contiene, pongo por caso, una mezcla de hidrógeno, metano y amoniaco. El agua se lleva a ebullición, la chispa actúa constantemente, y a tra-

vés del tubo en U se acumulan en el frasco pequeño los compuestos no volatilizables. En la figura 10 damos el resultado de un experimento típico. Durante las primeras veinticinco horas se forman principalmente cianógenos y aldehídos a costa del amoniaco. Entonces su concentración adquiere estabilidad, mientras que la formación de aminoácidos continúa regularmente hasta unas ciento veinticinco horas, siempre a expensas del amoniaco original.

WILSON logró producir recientemente —1960— moléculas poliméricas mucho mayores, compuestas cada una de 20 átomos y más de carbono. Estas formaron sólidos en forma de hojas o láminas, del orden de 1 cm de sección, en el frasco de las descargas eléctricas. Se cree que en este caso se formaban moléculas activas de superficie, que construían membranas en las superficies líquido-gaseosas. Esto concuerda bien con la idea general de que las películas hojosas de moléculas —véanse Figs. 11-13—, formadas por las intersuperficies líquido-gaseosas, sólido-gaseosas o sólido-líquidas, debieron desempeñar un papel importantísimo en las primeras fases de los procesos inorgánicos de los que, con el tiempo, surgió la primera vida.

FIG. 11. Películas foliares de macromoléculas "orgánicas", producidas mediante bombardeo de una mezcla de agua, amoniaco, sulfuro de hidrógeno y cenizas de levadura de pan (de A. T. WILSON, 1960).

FIG. 12. Microfotografía electrónica de macromoléculas "orgánicas" foliformes, producidas mediante sometimiento a descarga de una mezcla parecida teóricamente a la hidrosfera primitiva (de A. T. WILSON, 1960). Aumentada 6 500 veces.

FIG. 13. Microfotografía electrónica de una sola macromolécula "orgánica" (véase Fig. 12). Aumentada 16 120 veces.

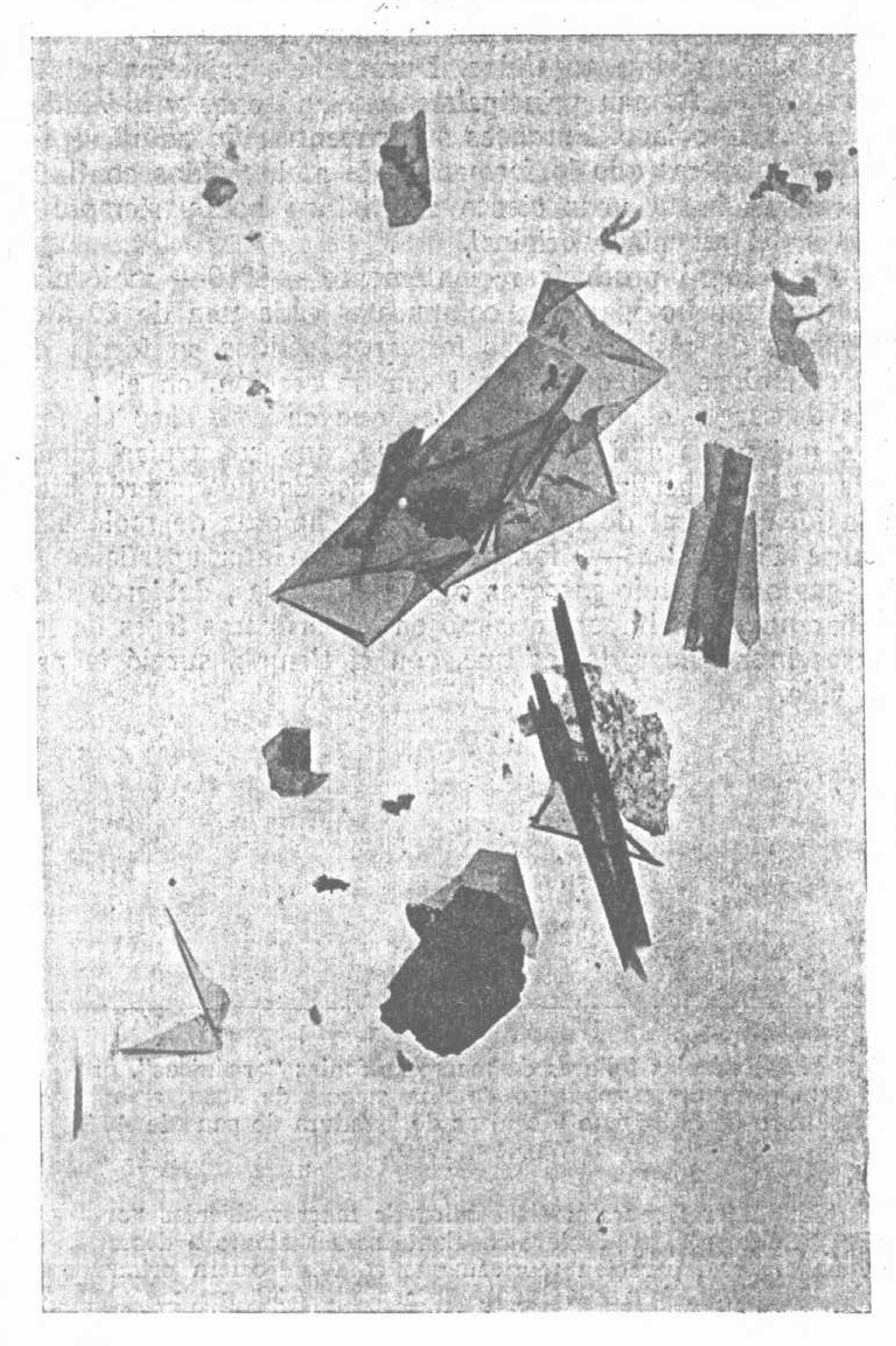


FIG. 11. (*Véase pág. 63.*)

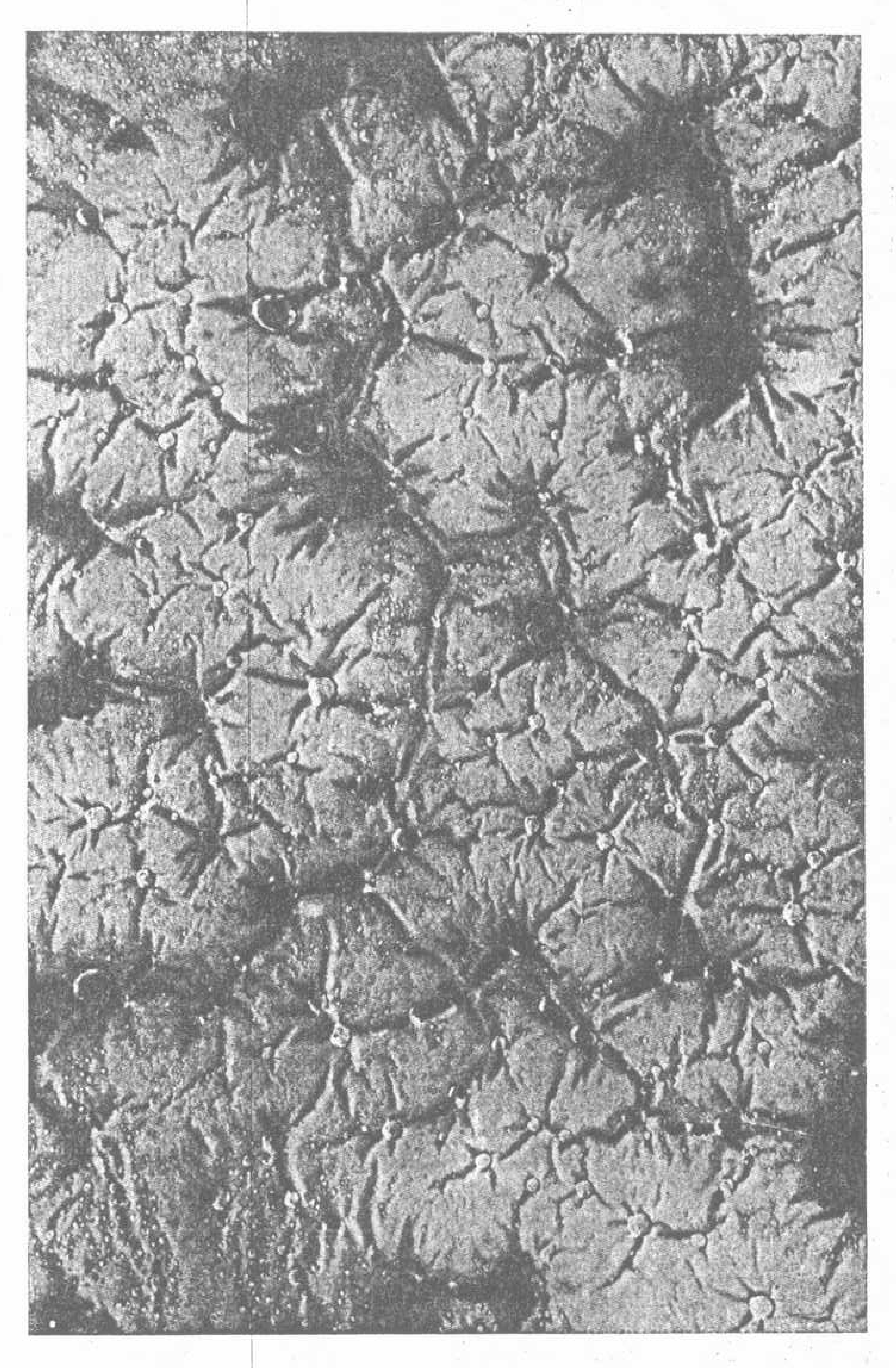


FIG. 12. (*Véase pág. 63.*)

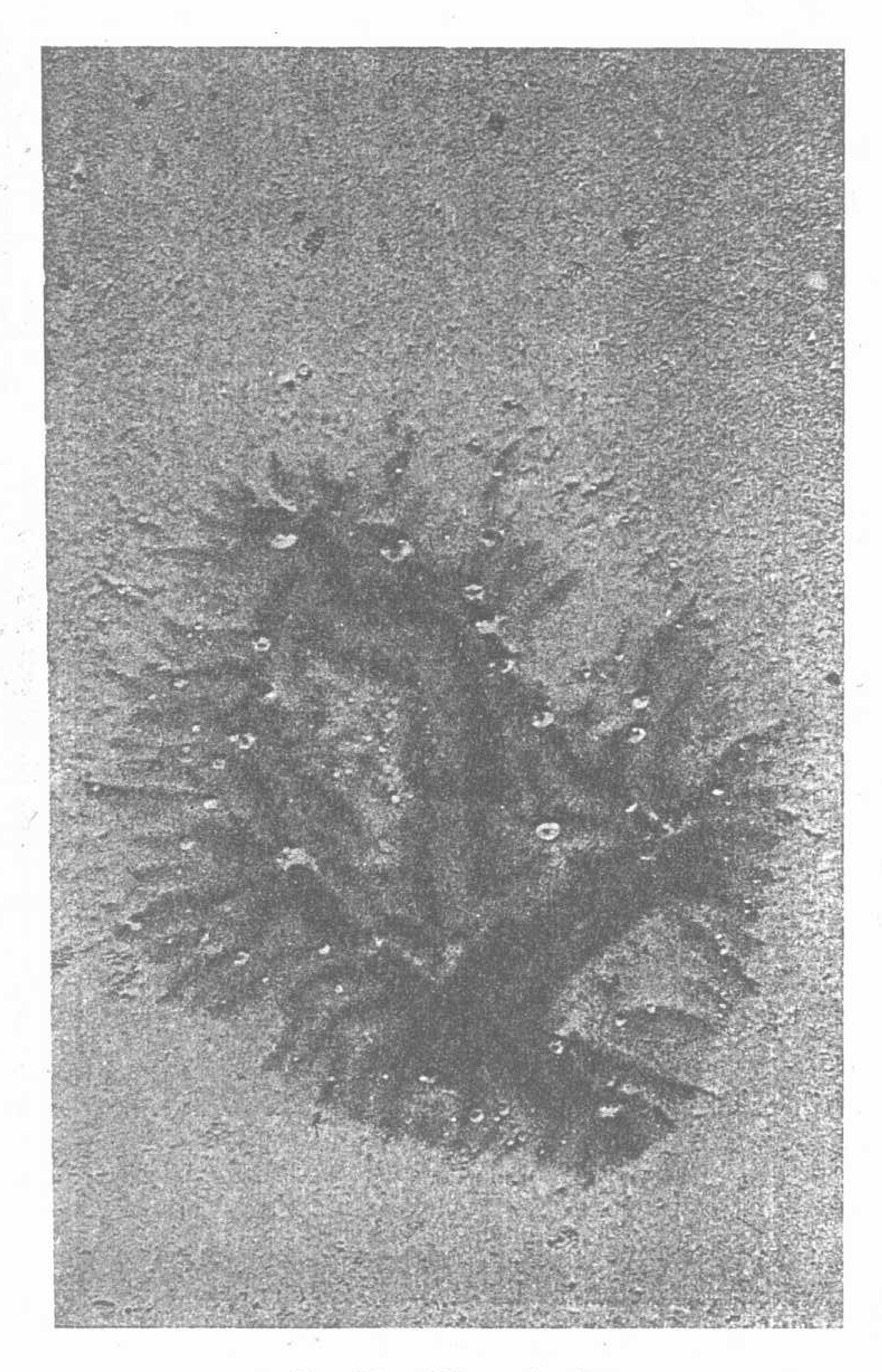


Fig. 13. *(Véase pág. 63.)*

DIVERSIDAD QUIMICA DE LA "VIDA" PRIMITIVA: ESQUEMA DE PIRIE

En aquellos primeros procesos de fotosíntesis inorgánica debieron intervenir otros muchos elementos. A diferencia de la vida actual, con su variedad inagotable de expresiones morfológicas basadas en un número reducidísimo de reacciones bioquímicas, aquellos primeros procesos de fotosíntesis inorgánica, aquella protovida, presentó probablemente una inmensa variedad química, pero sin cuajar tal vez aún en ninguna fórmula morfológica concreta.

Pirie acentuó esta diferencia en su famoso esquema, reproducido aquí en la figura 14. En simplificación extrema, puede representarse la evolución de la vida por un cono doble. El inferior representa la modalidad primitiva de la vida, con su gran número de elementos participando en los procesos inorgánicos de fotosíntesis, y afines, en el seno de la atmósfera original, carente de oxígeno libre. En el cono superior figura el desarrollo de la vida actual, con su variedad morfológica marcadísima, basada en cierto grupo de reacciones bioquímicas reducidísimas, bajo la nueva atmósfera oxigénica.

Desde las primeras reacciones inorgánicas de fotosíntesis, producidas en la atmósfera primitiva, que desembocaron en la formación del "caldo claro", transcurrió un lapso inconmensurable antes de que surgiera nada que se pareciese a la materia viva; aunque, naturalmente, ese periodo de tiempo estuvo bien ocupado con un número incalculable de actividades diferentes. Es difícil trazar una línea divisoria matemática y hasta puede ser que ni siquiera tenga gran interés. Es menos importante saber dónde hay que trazar la línea de división entre lo no viviente y lo viviente que tener una idea clara de la diferencia fundamental, mucho más trascendental, existente entre la atmósfera primitiva y la actual y, además, observar que, como veremos, existía realmente la vida en aquella atmósfera primitiva, una vida que fue capaz de legarnos, ya que no fósiles, al menos ciertos restos que se reconocen como productos orgánicos. La vida real coexistió con la protovida y también con aquellas reacciones fotosintéticas que cualquiera llamaría, sin dudar, inorgánicas. Aunque su metabolismo era

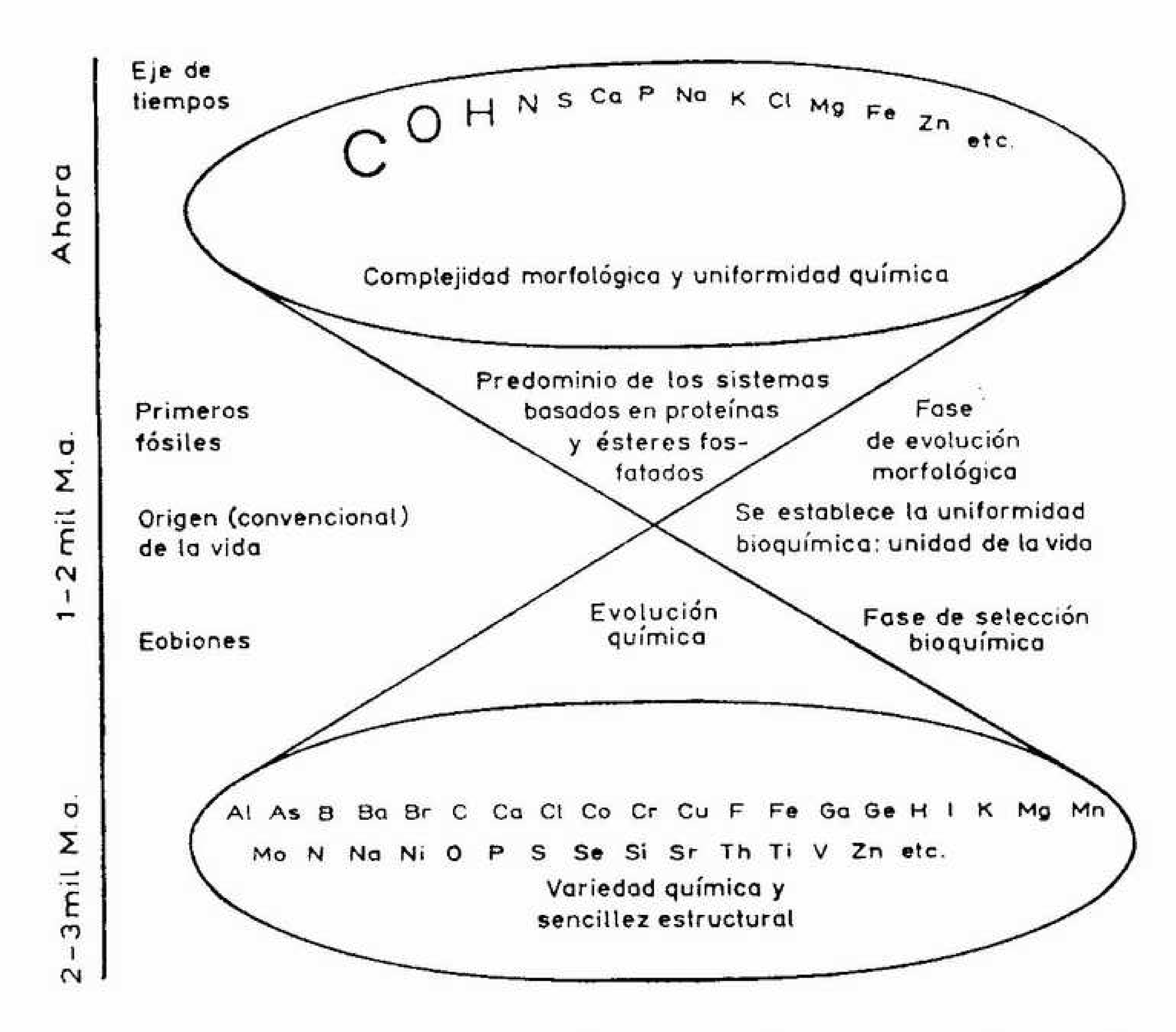


FIG. 14. Representación simplificada del origen y desarrollo de la vida en la Tierra, según PIRIE, 1959. El cono inferior muestra los procesos químicos inorgánicos primitivos y la vida primitiva, con su diversificación química, pero con escasa expresión morfológica. El cono superior representa el desarrollo de nuestro tipo de vida actual, caracterizado por una gran diferenciación morfológica a base de un grupo muy restringido de reacciones bioquímicas.

todavía anoxigénico, constituían formas de vida real coexistiendo con las formas primitivas, con los eobiones de Pirie.

En general, hubo de producirse una evolución primitiva hacia moléculas de sustancias orgánicas cada vez mayores y más complicadas, pero formadas aún por procesos inorgánicos. Normalmente, esas moléculas mayores se componían de unidades más pequeñas, cada cual de estructura parecida. Unidades repetitivas que constan de cadenas de bloques idénticos o relacionados. Pero esas moléculas, gracias a ciertas pequeñas diferencias físico-químicas que las distinguían de otros com-

puestos similares del mismo ambiente, pudieron incorporar con frecuencia a su estructura nuevos bloques, lo que significa que pudieron crecer.

En algunas especies de compuestos, ese crecimiento debió verse favorecido por la misma naturaleza de su substrato; por ejemplo, por la adsorción de arcillas o cuarzo, que entonces, como ahora, eran probablemente los minerales más comunes en la superficie de la Tierra. En ese tiempo debieron abundar también los sulfuros, por ejemplo, en forma de arenas de pirita. Son bien conocidas las activas propiedades catalíticas del azufre en reacciones del tipo de las que estamos exponiendo. Merece que señalemos, v. gr., que WILSON, en sus experimentos, logró producir macromoléculas después de introducir H_2S en la mezcla. Así es que la presencia del azufre pudo desempeñar un papel importante en aquellas primeras etapas.

Debió producirse otro paso ulterior, en el que varias clases de esas moléculas mayores y susceptibles de crecimiento llegaron a ser predominantes. Desde esta fase hasta la de los compuestos biomorfos, dotados de procesos metabólicos específicos y susceptibles de propagación, debió intervenir, naturalmente, otro estadio, en el que hubieron de producirse en gran número reacciones independientes. Este, sin embargo, es un paso que, aunque tuvo que darse gradualmente a través de una serie interminable de reacciones separadas, resulta perfectamente concebible, dados nuestros conocimientos actuales, tanto de Química orgánica como inorgánica.

MUTANTES QUE ADQUIEREN UNA NUEVA HABILIDAD: LA FOTOSINTESIS ORGANICA

Dentro todavía de la atmósfera primitiva, la vida debió producir mutaciones, incluso en aquellas mismas épocas primitivas. En efecto, la mutación es cosa competente a aquellas moléculas grandes de composición "orgánica". Aunque este fenómeno no es aún suficientemente comprendido, la mutación es el resultado de ciertas transposiciones en la estructura local de alguno de los pequeños bloques componentes de una molécula gigante; una desviación producida por algún flujo

energético con toda probabilidad externo, procedente de fuera, y posiblemente de carácter térmico o radiactivo.

En algún sitio y en algún momento dado, ciertas mutaciones de esa vida primitiva debieron producir compuestos capaces de realizar la fotosíntesis orgánica, por ejemplo, la asimilación orgánica. Así adquirieron la capacidad excepcional de disociar el dióxido de carbono —CO_2—, liberando ambos elementos —C y O_2—. El carbono pudo utilizarse para construir más materia orgánica a beneficio de los organismos vivos, mientras que el oxígeno escapaba a la atmósfera.

Las consecuencias de esa nueva capacidad de la vida primitiva fueron complejas y terminaron siendo abrumadoras. La primera ventaja conseguida con esta fotosíntesis orgánica no residía tanto en la facilidad que daba para obtener carbono con vistas a la elaboración de más materia viviente, cuanto en la cantidad muchísimo mayor de energía liberada mediante ese proceso, muy superior a la obtenida por el metabolismo anaeróbico. Todas las reacciones en las que no queda implicada la liberación de oxígeno, tales como las de las bacterias reductoras de los nitratos, sulfatos y carbonatos, desarrollan una producción de energía muy inferior a la que libera la asimilación del dióxido de carbono. Así, pues, el nuevo estilo biológico supuso una ventaja inmediata en la lucha por la vida a favor de la nueva fotosíntesis, sobre los organismos contemporáneos basados en el metabolismo primitivo.

Pero todavía hubo de irse imponiendo gradualmente un cambio más importante aún. Debido a la fotosíntesis orgánica, a la asimilación del dióxido de carbono, el oxígeno libre hubo de irse incorporando a la atmósfera en cantidades cada vez mayores. Hoy día se propone que todo el oxígeno libre contenido actualmente en la atmósfera se formó por fotosíntesis orgánica. Así, pues, todo el oxígeno libre de nuestro planeta sería de origen biogénico. Este oxígeno hubo de ir protegiendo gradualmente la superficie de la Tierra contra los rayos ultravioleta cortos de la luz solar, con lo que se fue constituyendo paso a paso un ambiente parecido al actual. Este, a su vez, acabó por extinguir, finalmente, todos los procesos primitivos de vida, todas aquellas reacciones cuasivitales, que fueron posibles en la primitiva atmósfera gracias a la utilización de la energía de las radiaciones solares ultravioleta de onda más corta.

EVOLUCION GRADUAL DE LA ATMOSFERA PRIMITIVA A LA ACTUAL

Por consiguiente, esa evolución desde la atmósfera primitiva, anoxigénica y reductora, a la atmósfera actual, oxidante, fue uno de los acontecimientos más significativos de la historia de la Tierra. Se siente la tentación de calificar esa evolución como catastrófica. Toda la vida primitiva estaba condenada a extinguirse, y toda la vida posterior, hasta el momento presente, arranca de ese origen. Pero, como vimos en los capítulos anteriores, hasta este mismo "cataclismo" hubo de producirse a fuerza de tiempo, muy gradualmente, considerado no sólo a escala humana, sino incluso a escala geológica. Salta a la vista que la liberación del oxígeno mediante la asimilación hubo de ser un proceso lentísimo; hubo de transcurrir infinidad de tiempo antes de producir oxígeno libre en cantidades suficientes para que se formase en la alta atmósfera la capa de ozono capaz de absorber de una manera eficaz los rayos ultravioleta cortos de la luz solar.

Teniendo, pues, en cuenta que esa transformación de la atmósfera primitiva en la actual siguió un proceso sumamente gradual, por catastrófica que fuese en sus resultados finales, se comprende que debieron coexistir en la Tierra por mucho tiempo —probablemente durante millones de años— las reacciones primeras químico-inorgánicas, pero que producían material "orgánico", junto con las primeras formas vitales basadas en el metabolismo anoxigénico, y junto con la nueva vida capaz de realizar la fotosíntesis orgánica y de asimilar el dióxido de carbono. En realidad, ese punto de intersección entre los dos conos del famoso esquema de Pirie —Fig. 14— debió cubrir una extensión enorme de tiempo.

PUNTOS DE VISTA DEL ASTRONOMO

Antes de dar por terminado este capítulo, no estará de más considerar otro aspecto del origen de la vida en la Tierra, aunque no sea de orden biológico. Es el punto de vista astronómico. Desde luego, podemos añadir aquí una breve reseña, pues en esta materia están muy de acuerdo los astrónomos y

biólogos. Tanto en FLORKIN —1960— como en el volumen completo del Symposium de Moscú de la I.U.B., aparecieron varios trabajos sobre los aspectos astronómicos de la cuestión. El resultado principal es que existen hoy día varias teorías cosmológicas: unas, que parten de una Tierra original en estado "frío", y otras, en estado "caliente". Pero ambas tendencias son compatibles con las concepciones biológicas modernas sobre el origen de la vida en la Tierra a base de causas naturales. Así se deduce del hecho de que, desde un punto de vista astronómico, nuestro Globo estaba perfectamente terminado antes de que estuviese a punto de brotar la vida.

Hay aquí, sin embargo, un punto interesante, relacionado con el oxígeno libre de nuestra atmósfera. Según los astrónomos, nuestra Tierra es demasiado pequeña, carece de suficiente masa y, consiguientemente, no tiene la fuerza de gravedad necesaria para retener permanentemente el oxígeno libre. En un planeta como el nuestro no debiera haber cantidad apreciable de oxígeno libre en la atmósfera, ya que, aun dado el caso que hubiese estado allí desde un principio, no hubiese tardado en disiparse, supuesto el ritmo enormemente rápido con que escapa desde las capas más altas de la atmósfera hacia los espacios interestelares. Sólo podemos esperar una atmósfera oxigénica como la nuestra en virtud de algún proceso parecido, por ejemplo, al de la asimilación orgánica del dióxido de carbono, que libera constantemente oxígeno libre hacia la atmósfera. Por eso los astrónomos ven con buenos ojos la hipótesis de que todo el oxígeno libre almacenado actualmente en nuestra atmósfera es de origen biogénico, formado en la fotosíntesis de las plantas mediante la fijación del carbono contenido en el dióxido.

CAPITULO 5

Las dos atmósferas anoxigénica preactualística y oxigénica actualística

AEROBICA Y ANAEROBICA, OXIGENICA Y ANOXIGENICA

Entre la atmósfera primitiva anoxigénica y la oxigénica actual existe una diferencia tan marcada como entre el día y la noche. Por supuesto, tuvo que haber un largo periodo de transición, pero entre los tiempos anteriores y los posteriores a ese periodo existe la más completa antítesis.

No siempre se ha destacado suficientemente en la bibliografía esta diferencia. Por lo pronto, muchos autores —la mayoría— hablan de las condiciones "anaeróbicas" predominantes en la atmósfera primitiva y se basan en que actualmente las formas vivientes anaeróbicas viven en condiciones que ofrecen cierto parecido superficial desde un punto de vista bioquímico, es decir, aisladas del oxígeno libre. Pero esos ambientes en la actualidad constituyen una especie de invernadero artificial, excepcional, cerrado al aire de una atmósfera que contiene hoy día oxígeno libre. De aquí que se los designe, muy adecuadamente, "anaeróbicos".

En cambio, en la atmósfera primitiva y en la hidrosfera contemporánea a ella la vida estaba muy lejos de ser anaeróbica, aunque la falta de oxígeno libre hizo pensar en una analogía bioquímica superficial. De hecho, la vida era aeróbica; pudo funcionar y desenvolverse en la atmósfera libre y expuesta al aire. Sólo que entonces no contenía oxígeno libre.

Aunque la vida en la atmósfera primitiva debió ser predominantemente aeróbica, exactamente igual que ahora, ello no cambia en nada el hecho de que aquella atmósfera primitiva aeróbica era diametralmente opuesta a lo que ahora constituye el ambiente aeróbico actual. Por eso es preferible hablar de atmósfera primitiva anoxigénica y de vida aeróbica anoxigénica en dicha atmósfera, en contraposición a la vida aeróbica oxigénica actual.

EXCLUSION DE LAS RADIACIONES DE LA LUZ ULTRAVIOLETA MAS CORTA

Pero además existe actualmente vida anaeróbica que es también anoxigénica. Aún no sabemos si en el periodo anoxigénico había también vida anaeróbica (y anoxigénica), excluida igualmente de la atmósfera primitiva. Pero existe la probabilidad de que las primeras formas vitales que desarrollaron la fotosíntesis y la asimilación orgánica estuvieran sometidas a dificultades y desventajas más o menos parecidas a las que tiene que afrontar la vida anaeróbica actual.

Consiguientemente, es probable que la asimilación orgánica se basase en las proteínas, como ahora. Pero hoy día las proteínas no son resistentes a la radiación de los rayos ultravioleta de onda más corta, que entonces penetraban todavía hasta la superficie de la Tierra. Por tanto, es muy posible que las primeras formas vitales, tal como hoy las conocemos, es decir, las primeras progenitoras del grupo que acabó por imponerse posteriormente en toda la línea, hubieron de estar constreñidas al principio a un círculo de condiciones ambientales sumamente estrecho, comparables en cierto sentido a las restricciones a que se ve sometida la vida anaeróbica actual. Es evidente que entonces no eran anaeróbicas, ya que ni siquiera la atmósfera era perjudicial a este respecto. Pero bien pudieron ser *arradiáticas* a la luz ultravioleta más corta, si se me permite acuñar este término. En un principio pudieron quedar confinadas en la hidrosfera, viviendo en ríos, lagos y océanos a suficiente profundidad para que los rayos ultravioleta perjudiciales más cortos pasasen ya filtrados por el "caldo claro", mientras que les llegase la zona roja del espectro, tan importante para la fotosíntesis orgánica, dado su poder de penetración mucho mayor. También pudieron vivir entre los poros del suelo, en contacto con el aire libre, pero protegidas contra luz solar directa. Claro que todas estas lucubraciones son puramente hipotéticas; pero conociendo la variedad prolífica que puede desarrollar la vida, es muy posible que algunas de las formas primitivas capaces de realizar la fotosíntesis orgánica y de resistir los rayos ultravioleta de onda corta viviesen en la hidrosfera primitiva, y otras entre los poros del suelo.

PREACTUALISTICA Y ACTUALISTICA

La diferencia entre ambas atmósferas no reside solamente en la ausencia o presencia de oxígeno libre, sino además en su efecto inmediato, es decir, en la capacidad o falta de ella de que los rayos ultravioleta cortos de la luz solar alcancen o no alcancen la superficie de la Tierra. Consideradas conjuntamente esas diferencias entre la atmósfera primitiva y la actual, creo que revisten tal importancia que bastan para justificar el que designemos la atmósfera primitiva como preactualista, en contraposición a la actual o actualista.

Me doy perfecta cuenta de que éste es un paso equívoco. Incluso en aquella atmósfera primitiva los procesos naturales seguían las mismas leyes naturales a que obedecen ahora. Por consiguiente, subsiste, si queréis, el uniformismo; como que éste constituye precisamente la base de toda la teoría bioquímica a que nos hemos referido en el capítulo precedente. Damos por supuesto que las reacciones químicas dentro de aquel "caldo claro" debieron ser las mismas exactamente que se producen ahora entre los mismos compuestos, tanto en los organismos como en el laboratorio.

Pero, aunque admitamos ese tipo básico de uniformismo o, digamos, de uniformidad en los procesos al nivel fisicoquímico, los resultados de esos mismos procesos, de antes y de ahora, son distintos, muchas veces incluso diametralmente opuestos. Esa diferencia, lo diré una vez más, procede de la antítesis completa existente entre la atmósfera primitiva anoxigénica y la actual oxigénica.

Para fijar bien esta distinción, que, sin ser esencial en los procesos fisicoquímicos primarios que sirven de base a ambas épocas, es fundamentalísima en su resultado definitivo, tal como se manifiesta en el ambiente que se fue creando eventualmente en la superficie de la Tierra, creo que está justificado el que designemos la diferencia existente entre la atmósfera primitiva y la presente con los términos contrapuestos de preactualista y actualista.

PROCESOS EXOGENICOS Y ENDOGENICOS

Esta distinción entre atmósfera preactual anoxigénica y actual oxigénica afectó también, naturalmente, a la superficie no vital de la Tierra, igual que a las capas superiores de la hidrosfera y de la litosfera, es decir, a todas las superficies contemporáneas de tierra y de agua que estuvieron en íntimo contacto con la atmósfera.

La Geología agrupa bajo una misma denominación de procesos exogénicos todos los procesos que tienen lugar en la superficie terrestre, en la llamada litosfera, o en las aguas, o hidrosfera. Sólo afectan a la capa exterior de la Tierra; y a su vez se ven muy afectados por la atmósfera. El grupo de los procesos exogénicos es de índole diferente del de los llamados endogénicos, que tienen lugar en el interior de la corteza terráquea. Tenemos procesos típicamente endogénicos, por ejemplo, en la formación de las montañas, en los metamorfismos de las rocas en profundidad, en la constitución de granitos, e incluso en los fenómenos volcánicos, aunque éstos tengan repercusión en la superficie y la alcancen. Representan fenómenos típicamente exogénicos la acción de la atmósfera, la erosión, la formación de suelos, el transporte y acarreo de materiales por los ríos, la sedimentación en las tierras bajas y en los océanos.

Ahora podemos afirmar que, en términos generales, todos los procesos exogénicos están influenciados por la composición de la atmósfera contemporánea bajo los que se desarrollan. Así es que podemos hacer extensivos los términos "actualista" y "preactualista" de la atmósfera a todos los procesos exogénicos de las épocas respectivas.

En cambio, no se debe aplicar a los procesos endogénicos correspondientes la distinción existente entre la atmósfera primigenia, anoxigénica y preactualística y la posterior oxigénica, actualística. Así, por ejemplo, la composición de la atmósfera no influye en la formación de las montañas ni de las rocas graníticas profundas. Y esto no es una consideración puramente teórica. Por ejemplo, al parecer, la constitución de las montañas, que es uno de los procesos endogénicos principales, parece seguir siempre cierta pauta fija de fenómenos en las épocas geológicas más recientes. Según esa pauta, empiezan

por depositarse muy gruesos espesores de sedimentos en una determinada zona o cuenca; la corteza cede lentamente, dando lugar a los llamados "geosinclinales". Tiene lugar después el plegamiento de esos sedimentos; y, finalmente, la consiguiente elevación de la corteza, que es el fenómeno que forma en realidad las montañas. Esta serie de fenómenos, comprendidos bajo el nombre de ciclo orogénico, es, por ejemplo, el motivo temático del "pulso de la tierra" de UMBGROVE —p. 12—. Parecidos procesos y ciclos orogénicos tuvieron sus desarrollos en las épocas más remotas de la historia terrestre, cuyos procesos coincidían en sus características generales con la forma en que se desarrollaron los ciclos orogénicos de la historia geológica más reciente, si juzgamos por cuanto nos es posible apreciar en el estado presente del arte de la Geología. Tales procesos se remontan hasta las rocas más antiguas de la corteza terrestre datadas hasta ahora. En contraste con la diferencia que se supone haber existido entre la atmósfera primitiva y la presente, y entre sus procesos exogénicos correspondientes, en los procesos endogénicos no se acusa esa distinción tan radical. Hasta donde llegan a alcanzar nuestros conocimientos, los procesos endogénicos de la corteza terrestre más arcaicos son totalmente análogos a los que encontramos en la historia más reciente de la Geología. Por todo cuanto sabemos, los procesos endogénicos son ya de tipo actualístico a partir de las rocas más antiguas cuya edad ha sido posible fijar.

ACTUALISMO EN LOS PROCESOS PRIMITIVOS EXOGENICOS Y ENDOGENICOS

Más adelante veremos que la transición de la atmósfera primitiva preactualística a la actualística puede fijarse provisionalmente que ocurrió hace de dos mil a mil millones de años. Por otra parte, los procesos endogénicos, v. gr., los ciclos orogénicos, fueron sustancialmente idénticos en la formación de las rocas más antiguas, cuya edad se había establecido, al tiempo que se escribió este libro, en 3 300 millones de años.

Por consiguiente, existe una marcada diferencia en la historia del desarrollo de los procesos exogénicos y de los endo-

génicos. En una época en que los procesos endogénicos seguían ya una pauta actualista, los exogénicos estaban sometidos aún al influjo de la atmósfera preactualista, y eran completamente diferentes de los procesos exogénicos de las épocas de la Geología histórica más joven y de la actual.

CAPITULO 6

Dónde buscar restos de vida primitiva: los escudos antiguos

ESCASEZ DE DOCUMENTOS PRIMITIVOS

Si volvemos de nuevo a la Geología en busca de hechos relativos al origen de la vida, encontramos que escasean deplorablemente. Se han hallado poquísimos fósiles correspondientes a la historia primitiva de la Tierra.

Esto se debe a varias razones, que pueden resumirse así: la blandura y el tamaño tan pequeño de las formas primitivas de vida, aparte de que las rocas más antiguas han quedado recubiertas y enmascaradas en su mayoría por otras más recientes. A esto hay que añadir el tiempo tan largo transcurrido, de modo que la extraordinaria vejez destruyó la estructura primaria de muchas de las rocas formadas en aquellas épocas.

Todas las formas biológicas primitivas eran de muy reducido tamaño; constaban de protoplasma o de tejidos blandos de índoles parecidas, y carecían de partes duras. En el capítulo siguiente desarrollaremos estos conceptos más a fondo. Baste recordar aquí que las formas primitivas de vida pueden compararse a nuestros microbios actuales, y los microbios, por regla general, tienen poquísimas probabilidades de quedar fosilizados.

Además, la mayor parte de las rocas que se formaron en aquellas épocas remotas escapan a nuestra capacidad de inspección. Fueron soterradas por enormes acumulaciones de rocas más jóvenes, en su mayor parte de origen sedimentario, y ahora yacen situadas a varios kilómetros y hasta decenas de kilómetros por bajo de la superficie terrestre. E incluso las que han vuelto a aflorar a la superficie, a menudo han experimentado considerable estropicio al cabo de su historia mil millonaria.

Además, aun esas que ahora afloran a la superficie, en la mayoría de los casos se vieron sepultadas también, temporalmente al menos, por sedimentos más jóvenes, que de entonces

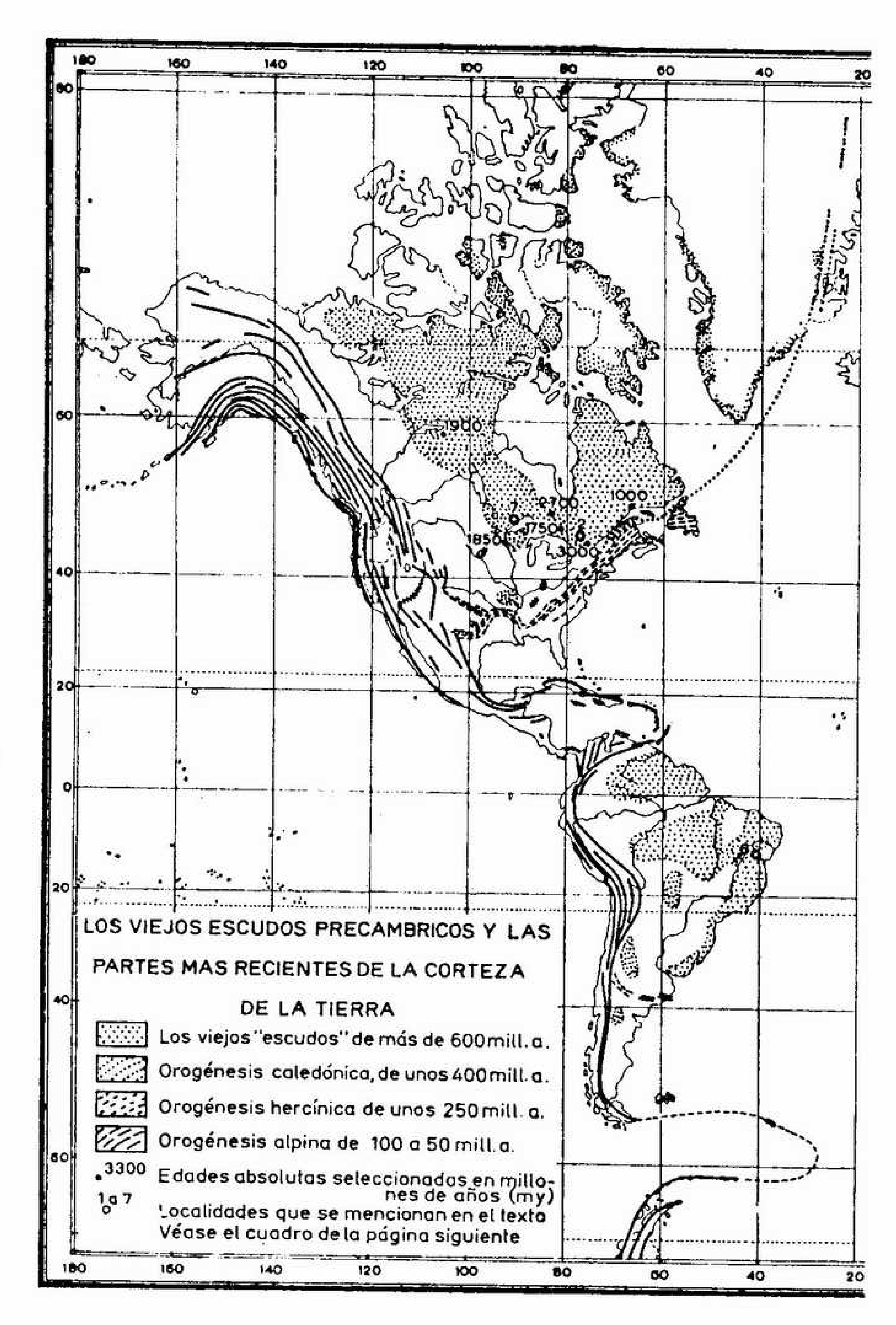
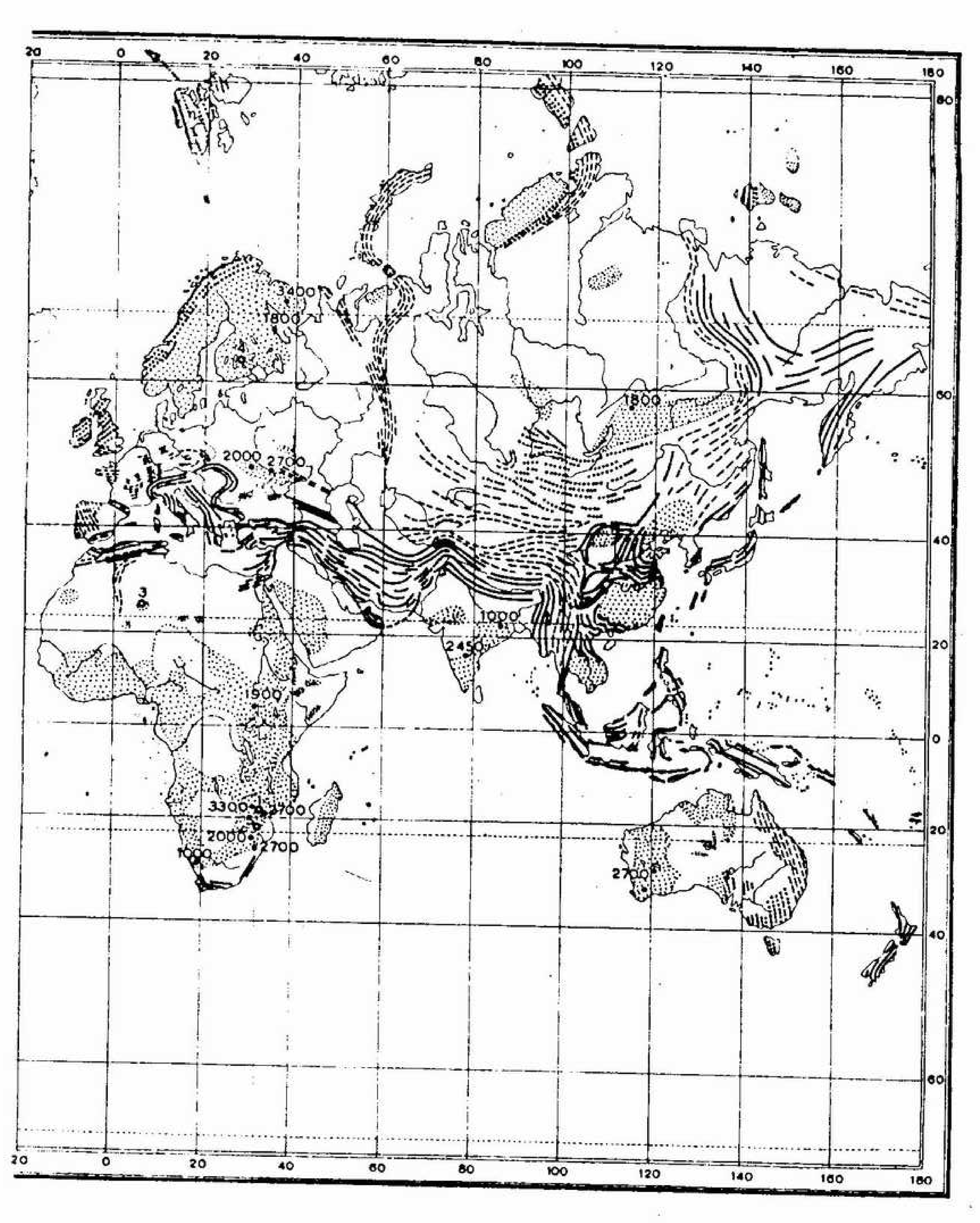


FIG. 15. Los escudos precámbricos viejos y las partes más recientes de la corteza (de UMBGROVE, 1947). Las edades absolutas han sido determinadas principalmente por TILTON y DAVIS, 1959.



(FIG. 15.)

acá fueron de nuevo eliminados. Muchas veces han experimentado plegamiento; otras han introducido en ellas enormes masas graníticas (batolitos) surgidas de grandes profundidades. Todos esos acontecimientos exponen a las rocas temporalmente a altas temperaturas o a altas presiones, cuando no a ambas. La consecuencia es que se crea en las viejas rocas cierta tendencia a dar movilidad a los minerales que las forman, de modo que se vuelven a combinar, y recristalizan, o bien en cristales de mayor tamaño y composición análoga, o incluso en cristales de composición totalmente diferente. En ambos casos por fuerza han de quedar destruidas las estructuras primarias de la roca, y entre ellas, los fósiles.

TABLA IV

Lista de los parajes indicados en la figura 35.
Edades absolutas dadas en la figura 36

1. Sedimentos biogénicos más antiguos conocidos, los organismos segregantes de cal, descritos por MAC-GREGOR. Cfr. pp. 91-95.
2. Fósiles más antiguos conocidos. Plantas y microbios primitivos, descritos por TYLER y BARGHOORN. Cfr. pp. 97-104.
   En la misma zona general también yacimientos de uranio del Blind River, constituidos bajo la atmósfera preactualística. Confróntese pp. 113-125.
3. Algas segregantes de cal, relacionadas con el género *Collenia,* descritas por GRAVELLE y LELUBRE. Cfr. pp. 104-106.
4. Residuo de granito precámbrico, meteorizado pero no oxidado, formado bajo la atmósfera preactualística, descrito por RANKAMA. Cfr. pp. 111-113.
5. El Dominion Reef, con oro y uranio y también los arrecifes de Witwatersrand, constituidos bajo la atmósfera preactualística, descritos por RAMDOHR. Cfr. pp. 113-125.
6. Arrecifes de oro-uranio de Serra de Jacobina, formados también bajo atmósfera preactualística, descritos por RAMDOHR. Cfr. 113-125.
7. Yacimientos de hierro del Lago Superior constituidos, al menos en parte, bajo atmósfera preactualística, según LEPP y GOLDICH. Cfr. pp. 125-127.

Aunque escasean los restos fósiles referentes a la historia primitiva de la vida sobre nuestro planeta, debemos aprovechar, naturalmente, los elementos disponibles. El primer punto que se toca en este capítulo es dónde se deben buscar los

vestigios más antiguos de la vida primera sobre la Tierra. En el capítulo próximo describiré los fósiles hallados, mientras que en el 8 estudiaré el ambiente en que se desarrolló aquélla. El que esto sea posible se debe a que, como vimos en el capítulo anterior, la existencia de atmósferas preactualistas o actualistas es lo que rige principalmente el ambiente, al mismo tiempo que influye en todos los procesos exogénicos contemporáneos producidos sobre la superficie terrestre.

LOS VIEJOS ESCUDOS

Los restos fósiles de la vida primitiva han de buscarse en las zonas más antiguas de la corteza terrestre, es decir, en las regiones conocidas técnicamente con el nombre de "escudos antiguos". Se caracterizan por la presencia de rocas precámbricas aflorantes en la superficie terrestre, sin cobertera de capas de rocas más recientes.

En la mayor parte de los manuales de Geología se señalan las zonas más antiguas como distintas por completo con respecto a las zonas más jóvenes de la corteza terrestre. Si nos fijamos, por ejemplo, en la lámina V del *Pulse of the Earth* de UMBGROVE, que reproducimos aquí en la figura 15, vemos indicadas dichas zonas con un moteado, sin la menor indicación de direcciones estructurales acusadas, contrastando, en consecuencia, llamativamente con las regiones más modernas de la corteza, en las que se indican las principales direcciones de los sistemas de cinturones orogénicos más jóvenes.

Esta diferencia entre las áreas antiguas y recientes de la corteza que sugieren la mayoría de los textos de Geología es sólo aparente. Es consecuencia de la supuesta ruptura que imaginaba la Geología clásica entre toda la historia precámbrica de la Tierra y la época posterior. Pero de hecho, como vimos en el capítulo 3, la única diferencia consiste en que a partir de aquella discontinuidad más o menos aparente, encontramos fósiles suficientes para determinar la edad relativa de las rocas más jóvenes. Por el contrario, el periodo precámbrico se subdividió solamente, y eso de una manera muy vaga, en Arcaico y Algónquico, o en Azoico y Proterozoico. Pero esas divisiones no tienen prácticamente sentido precisamente por falta de fósiles. Las correlaciones establecidas entre

rocas precámbricas encontradas en continentes distintos no tienen fundamento real o actual.

Sólo ahora se ha hecho posible descifrar la estructura y la historia de los "escudos antiguos" gracias al empleo de las técnicas de cronometría absoluta. Por eso el lector deberá mirar con gran precaución y examinar atentamente cualquier conclusión anterior a estas dataciones referentes a las relaciones cronológicas existentes entre las rocas procedentes de cualquiera de los escudos viejos. Aparte de que, con frecuencia, en este terreno como en otros muchos, esas conclusiones suelen hacerse de una manera tanto más tajante cuanto menos hechos hay que les puedan servir de base.

La diferencia aparente entre las antiguas y las nuevas áreas de la corteza no consiste tanto en sus peculiaridades estructurales, sino en que no sabemos casi nada acerca de las primeras. El hecho de que se señalen las zonas más arcaicas con un simple moteado no quiere decir que carezcan de estructuras, sino que desconocemos la manera de correlacionar las estructuras locales para formar un cuadro de conjunto.

Así es que nos limitaremos aquí a señalar, simplemente, la localización de los "antiguos escudos", tales como aparecen en la figura 15. En cierto sentido, esas zonas forman los núcleos de los continentes. En el hemisferio septentrional vemos una serie de "escudos viejos", que son complejos en Asia, aparte de los de Canadá y de Fennoscandia. En el hemisferio meridional encontramos áreas correspondientes en el Brasil, Sudáfrica y Australia. Hay otras zonas sueltas más pequeñas, tales como en Madagascar y en la India. Cualquiera que esté familiarizado con la Geología sabe que esas zonas precisamente son las que han dado más que teorizar acerca de su posición primitiva.

ESTABILIDAD DE LOS ESCUDOS VIEJOS

También podemos dejar este campo a los especialistas y volver a nuestro aserto de que sólo en esas zonas arcaicas pueden encontrarse vestigios del origen de la vida en la Tierra y de la vida primitiva misma. En todos los demás sectores el basamento precámbrico ha quedado recubierto por rocas más recientes. En estas zonas más jóvenes podemos distinguir actualmente regiones en que la corteza se mantuvo relativamente

estable y en que el basamento precámbrico sólo se vio cubierto por un espesor sedimentario no demasiado grueso. Esas zonas, que rodean más o menos los antiguos "escudos", aparecen en blanco en la figura 15. En todos los demás sectores se ha hundido la corteza muchísimo más profundamente. En consecuencia, tuvimos la formación de cuencas geosinclinales perfectamente definidas, donde se acumularon series espesísimas de sedimentos, provocando más tarde los consiguientes cinturones de pliegues de los ciclos orogénicos. En la figura 15 se indican los tres ciclos orogénicos más importantes que han tenido lugar desde el comienzo del Cámbrico.

De esta breve exposición se deduce que los escudos antiguos, junto con las amplias zonas que los circundan, permanecieron más o menos estables durante la historia posterior. Con frecuencia los nuevos ciclos orogénicos se desarrollaron periféricamente con respecto a los más antiguos, pero fuera de ellos, por lo que no los perturbaron. Las zonas más viejas de plegamiento quedaron, sin que sepamos bien por qué, solidificadas, rígidas. Es muy socorrida la comparación, un tanto ingenua, en que se parangonan los sedimentos plegados durante los ciclos orogénicos primitivos con una plancha de hierro ondulada, que es también más resistente que una de hierro plano. Aunque probabilísimamente esa comparación carece de fundamento, puede ayudarnos a visualizar esa distinción entre las áreas de corteza solidificada, al parecer por la actividad orogénica primitiva, y las que se movilizaron más adelante y se desarrollaron hasta formar las cuencas geosinclinales de los ciclos orogénicos más recientes.

Distinción que tiene su importancia al buscar áreas donde poder encontrar vestigios de la vida primitiva. En las plataformas estables de los ciclos orogénicos más antiguos pudieron haberse depositado nuevos sedimentos de tiempo en tiempo a lo largo de la historia posterior. Pero esos sedimentos más recientes son relativamente delgados, comparados con las gruesas capas de sedimentos depositados en las cuencas geosinclinales. Esas capas finas de sedimentos más jóvenes no provocan tan altísimas presiones y temperaturas en las rocas subyacentes. Cuando esas rocas que forman el fondo se alzan de nuevo en periodos posteriores y la erosión arrastra las capas de sedimentos más modernos que las recubrían, las rocas del basa-

mento, de nuevo expuestas, no mostrarán excesivo metamorfismo ni una recristalización demasiado marcada de sus minerales constitutivos. Por consiguiente, sólo en aquellas partes de la corteza estabilizadas desde los tiempos más remotos podemos esperar el hallazgo de restos fósiles intactos de seres vivos primitivos.

En el Cámbrico europeo puede verse un ejemplo de esa diferencia entre los metamorfismos que presentan rocas de la misma época, según que se hayan depositado en una cuenca geosinclinal de ciclo orogénico o en una plataforma estable. Alrededor de todo el antiguo perímetro de Fennoscandia, núcleo arcaico del continente europeo, fueron depositándose sedimentos desde el Cámbrico hasta el Silúrico. En Noruega y Escocia se constituyó al mismo tiempo una cuenca geosinclinal que a su vez dio origen al sistema orogénico de Caledonia, con grosísimas series de sedimentos. Todavía más al Este se fueron depositando series mucho más delgadas sobre el fondo estable precámbrico. Pues bien, las rocas en el cinturón de pliegues caledónicos han sufrido metamorfismos más o menos acentuados, mientras que las de la meseta estable se vieron tan poco afectadas, que en los alrededores de Moscú se fabrican ladrillos con arcillas blandas de edad cámbrica.

ESTRUCTURA COMPLEJA DE LOS ANTIGUOS ESCUDOS

Contrastando con la impresión que produce el moteado uniforme con que muchos textos de Geología suelen marcar los escudos, éstos presentan una constitución parecida a la de las zonas más jóvenes de la corteza. También pueden encontrarse en los escudos series sucesivas de cinturones orogénicos más antiguos y más modernos con respecto a aquéllos, mientras que parte de las áreas sujetas a los ciclos orogénicos anteriores no se han visto movilizadas por fenómenos orogénicos posteriores. Por consiguiente, los escudos viejos no constituyen una zona simple y uniforme que venga a formar el núcleo de estructuras más tardías. Ellos mismos están constituidos por núcleos viejos y aún más viejos, y ceñidos —y aun a veces cortados y atravesados— por cinturones orogénicos más recientes. Así se indica en la figura 15, donde se asignan varias edades absolutas para diversos puntos de esos escudos.

Se aprecian a primera vista las enormes variaciones que pueden presentar las diversas edades de distintas partes de los escudos, situadas muchas vece en inmediata vecindad unas de otras. En la tabla III señalamos algunas de las orogenias principales del período precámbrico.

Naturalmente que cuanto más retrocedemos en la historia de la Tierra tanto más pequeños son esos núcleos antiquísimos, que habían quedado estabilizados ya en virtud de ciclos orogénicos aún más primitivos, y tanta mayor probabilidad hay de que en el transcurso de algún nuevo proceso orogénico posterior se movilizase la corteza, dando lugar a desarrollos geosinclinales que destruyesen todos los fósiles anteriores mediante el proceso de metamorfismo y de recristalización. Así pues, cuanto más antiguas sean las rocas, tanto más expuestas están a que cualquier incidencia adversa destruya los fósiles que posiblemente pudiesen encerrar. Si a esto se añade el hecho de que toda la vida primitiva era de tipo microbiano, es fácil explicarse la escasez de fósiles representantes de la vida primitiva sobre la Tierra. Los fósiles, ya abundantes desde el Cámbrico en adelante, "sólo" tienen, a lo sumo, unos quinientos millones de años. La investigación de la vida primitiva y sus orígenes nos remonta a categorías de tiempos comprendidas entre el millar de millones y los dos y aun tres mil millones de años.

CAPITULO 7

Los fósiles

FAUNAS DE FINALES DEL PRECAMBRICO

Ya indiqué que el muestrario de fósiles de la vida primitiva en la Tierra es de una penuria deplorable. Acaso haya que matizar este aserto, ya que existe una literatura bastante extensa sobre fósiles procedentes del Precámbrico. Pero en términos generales, todos ellos proceden de sedimentos de finales del periodo precámbrico. Por consiguiente, no son tan antiguos que digamos; por lo demás, está claro que son los precursores de la fauna cámbrica, mucho más desarrollada y mejor conservada.

Esta vida de finales del Precámbrico comprende restos fósiles entre los que figuran algas, radiolarios y crustáceos, que revelan la existencia de fauna y flora tan rica como variada, y que ya no era exclusivamente microbiana. Los organismos de finales del Precámbrico pertenecían ya a niveles más altos de organización y constitución que los que necesitamos encontrar cuando pretendemos estudiar la vida primitiva sobre la Tierra y discurrir acerca de su origen. Los crustáceos, animales segmentados dotados de esqueleto exterior duro, distan tanto del origen de la vida como un avión a reacción de una carretilla de mano.

Consiguientemente, estos complejos fósiles de los últimos tiempos del Precámbrico, procedentes de diversos "escudos antiguos", arrojan poca luz sobre la vida primitiva. Todos proceden de sedimentos depositados muy poco antes que la base del sistema Cámbrico. Su edad absoluta no pudo ser muy superior a los 600 millones de años, en que se sitúa actualmente la base del Cámbrico. Según todas las probabilidades, tiene que estar muy por debajo del millar de millones de años.

IMPORTANCIA DE LOS MICROBIOS

Dije que los organismos de finales del Precámbrico fueron los precursores inmediatos de los del Cámbrico y que revelan ya un alto nivel de organización. Este tema pone de relieve la importancia de los microbios, no sólo en la vida primitiva, sino también en nuestro ambiente actual, lo cual está en vivo contraste con la forma un tanto despectiva con que la Paleontología suele tratar a estos minúsculos seres. Claro que esa actitud, ese olvido aparente con que la mayoría de los manuales de Paleontología suelen pasar por alto hasta la misma existencia de los microbios, se debe a la extrema escasez de restos micróbicos fosilizados. Sólo en circunstancias rarísimas de fosilización, como cuando quedan silicificados o sepultados en ciénagas, pudieron tener los microbios la más remota posibilidad de que quedasen conservados sus restos a lo largo de las interminables épocas geológicas.

Constituye esto una circunstancia desgraciada, dada la importancia que tienen los microbios, no sólo considerados en sí mismos, sino en relación con todos los restantes seres vivos. Ellos componen, en peso bruto, las tres cuartas partes de la materia viva en nuestro mundo actual, y, además, no tienen rival posible en la variedad de sus procesos metabólicos. Como si esto fuera poco, muchos de los procesos vitales constituyen la base de las funciones diarias de los organismos superiores. Aun suponiendo que la vida de los organismos superiores fuese posible sin intervención de los microbios —como parecen demostrar ciertos experimentos verificados en condiciones de escrupulosa esterilización—, y aun suponiendo que esto fuera posible también en la Naturaleza, aún podríamos preguntarnos con KLUYVER: "¿Es eso vida tal como la que conocemos nosotros? ¿Es que realmente la vida sin microbios es vida? ¿Valdría la pena vivirla sin pan ni vino, sin cerveza ni queso?"

Tratándose de la vida primitiva, es todavía mayor, naturalmente, la importancia de los microbios, por ser ellos los que constituyen la base evolutiva de todas las demás formas posteriores de organización superior. De aquí se sigue que, si queremos buscar restos de vida primitiva, hemos de prescindir de la Paleontología corriente, ya que ésta se interesa princi-

palmente por las partes duras bien conservadas de seres de muy superior organización, que se prestan a una bonita clasificación e interpretación dentro de los esquemas evolutivos. Hemos de buscar restos de microbios primitivos y demás formas de vida de organización rudimentaria, y luego deducir, de los rarísimos ejemplares que han quedado conservados, el desarrollo y la historia de la vida primitiva sobre la Tierra. La escasez de ese material "ex-vivo" nos obliga a desarrollar nuestro tema en términos muy generales.

RESTOS DE PRINCIPIOS DEL PRECAMBRICO

Si nos remontamos de hecho más allá de esos organismos de finales del Precámbrico, nos encontramos con un número muy reducido de hallazgos. Los más primitivos, que hasta ahora son también los de mayor edad absoluta, corresponden a organismos secretores de cal, a los que con frecuencia se los denomina con el término algo indefinido de "algas", y que proceden de Africa del Sur. Su descripción la debemos a MacGregor. Aunque resultan totalmente convincentes, no se trata de fósiles auténticos, de restos de organismos primitivos conservados en su misma estructura, sino de cal segregada por organismos primitivos, comparable a las concreciones de calizas travertinas que actualmente segregan las algas durante su metabolismo. Pero aun así, representan hasta ahora el vestigio más antiguo de la existencia de la vida en la Tierra.

En cambio, hay un descubrimiento más reciente de fósiles auténticos. Son unas plantas primitivas silicificadas, descritas por Tyler y Barghoorn; proceden del viejo escudo canadiense y han conservado su estructura con detalle microscópico. Pero su edad absoluta es muchísimo menor que la de los depósitos orgánicos hallados por MacGregor en Africa del Sur.

También en Africa Central se han encontrado muchos depósitos calizos formados por organismos primitivos. Este grupo presenta un gran parecido, y probablemente está relacionado, con un tipo que pervivió hasta épocas mucho más modernas. Se conoce tal género con la denominación de *Collenia* y se encuentra en varios de los escudos antiguos, donde forma grandes colonias, e incluso biohermas (arrecifes), desde



finales del Precámbrico hasta el Silúrico. Me remitiré aquí a la descripción hecha por Gravelle y Lelubre, pero se han hallado otros muchos restos parecidos. En este caso, aunque tampoco se trata de verdaderos fósiles, sino sólo de yacimientos de cal segregada por organismos primitivos, la estructura y gran volumen de cada colonia individual, junto con su frecuencia bastante común, indican gran exuberancia de vida al tiempo de su formación. Pero la cronometría absoluta de estos restos se basa hasta ahora en indicios vaguísimos, y antes de aceptar como cierto que esas formas sean realmente tan antiguas, habrá que contar con determinaciones de edad mucho más seguras.

LOS YACIMIENTOS BIOGENICOS MAS ANTIGUOS

El escenario de los restos más antiguos constituidos por actividad orgánica, de entre los conocidos hasta ahora, es Africa del Sur y, más en concreto, Rhodesia del Sur, en la zona de Bulawayo. Allí las series precámbricas están formadas principalmente por pizarras cristalinas, rocas metamórficas ultrabásicas, granitos batolíticos y en diques, y por volcánicas antiguas; es decir, rocas todas ellas en que jamás se podrán encontrar vestigios de vida primitiva. Pero también hay allí restos de sedimentos que han sufrido un metamorfismo relativamente reducido y cuya deposición tuvo lugar también en el periodo Precámbrico. Entre ellos ofrecen particular interés las series de la dolomita, cuyos estratos se explotan como canteras de cal en la zona de Bulawayo. Las áreas en que todavía se conservan estos antiguos sedimentos están separadas por rocas metamórficas e ígneas, lo cual dificulta el establecimiento de una estratigrafía detallada de la serie de la dolomita. Pero es seguro que es antiquísima, pues está cortada por venas graníticas más recientes, cuya cronometría absoluta arroja la cifra de 2 670 millones de años, ó 2 700 millones en números redondos.

Las series de la dolomita se componen de calizas y dolomías (caliza magnesiana). En las calizas aparecen, en capas bien definidas, estructuras de estratificación peculiar. Presentan como series de cúpulas o de formas dentadas más finas en sus caras superiores; pero examinadas más de

cerca, se ve que están constituidas por sucesiones de finos estratos que se ajustan en su trazado más o menos al de la superficie exterior. Estas capas, que pueden tener unos 3 cm de separación en la parte central de las cúpulas, se estrechan notablemente hacia el exterior. Mejor que las palabras, podrán darnos una idea de estas estructuras las imágenes tomadas de la pared de la cantera, como indicación de su forma general, y de las superficies pulimentadas o atacadas, que nos ofrecen su estructura detallada (Figs. 16-19). Importa no-

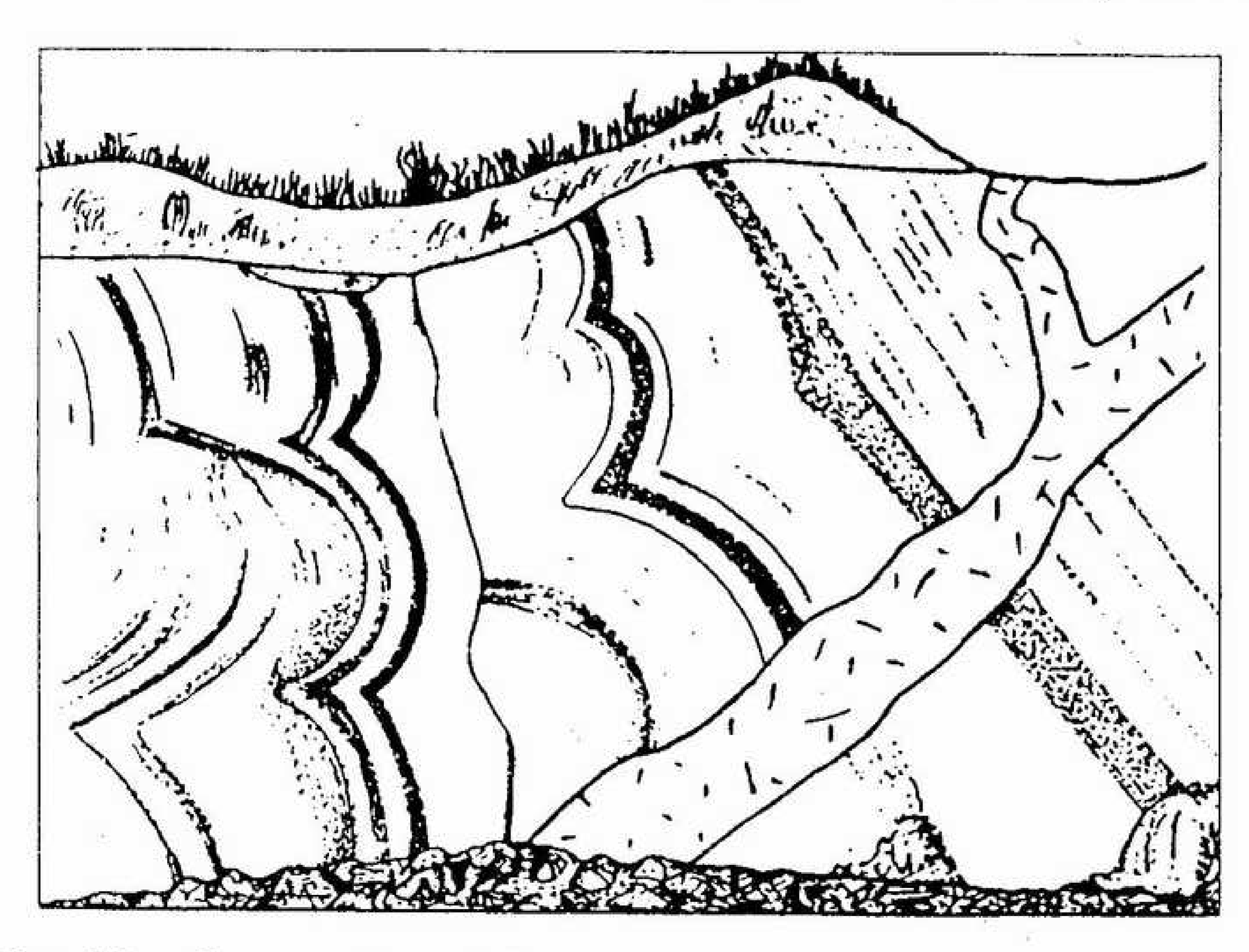


FIG. 16. Cara occidental de una cantera de calizas cerca de Bulawayo, en Rhodesia del Sur. Unos cinco metros de largo. Serie dolomítica precámbrica, con estructuras biogénicas, cortadas por diques graníticos más recientes (de MACGREGOR, 1940).

tar: la forma cupular o dentada; su constitución en capas definidas; la fina estratificación de su microestructura. Esta muestra cierto grado de regularidad que nos es muy conocida por los depósitos calizos precipitados por algas de épocas ya posteriores y por los primitivos celentéreos; pero, por otra parte, resulta demasiado irregular para tener su origen en sedimentos rítmicos inorgánicos. Con razón concluye MACGREGOR —1940— que se trata de yacimientos biogénicos origi-

nados por organismos de secreción caliza correspondientes a la época en que se formaron las capas de la serie de las dolomitas.

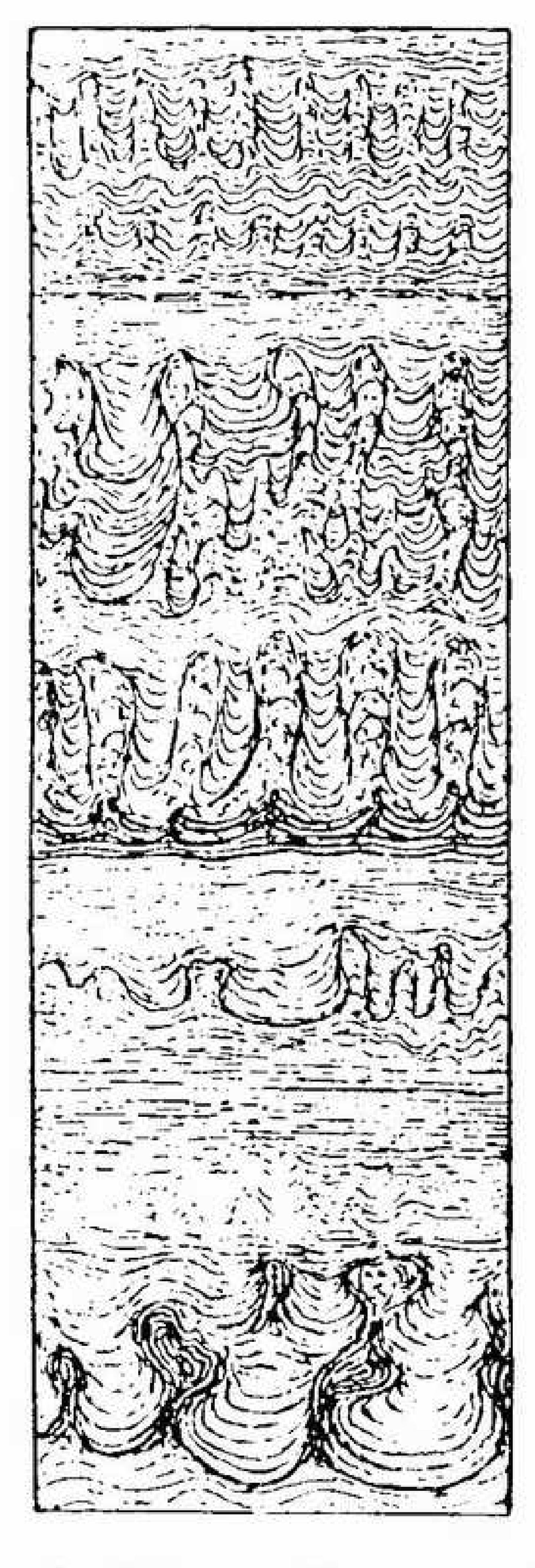


FIG. 17. Series de depósitos calizos precámbricos, problablemente biogénicos en lechos paralelos. Series dolomíticas, cerca de Bulawayo, en Rhodesia del Sur (×1/40) (de YOUNG, 1940 a).

Debido a la semejanza que presentan con los yacimientos de algas de secreción caliza encontrados en la historia geológica posterior y en la actual, a los yacimientos de Rhodesia se los conoce comúnmente como "calizas de algas". Dicho parecido ha llegado a inducir a algunos científicos a buscar yacimientos calizos algales de épocas posteriores, pero de cons-

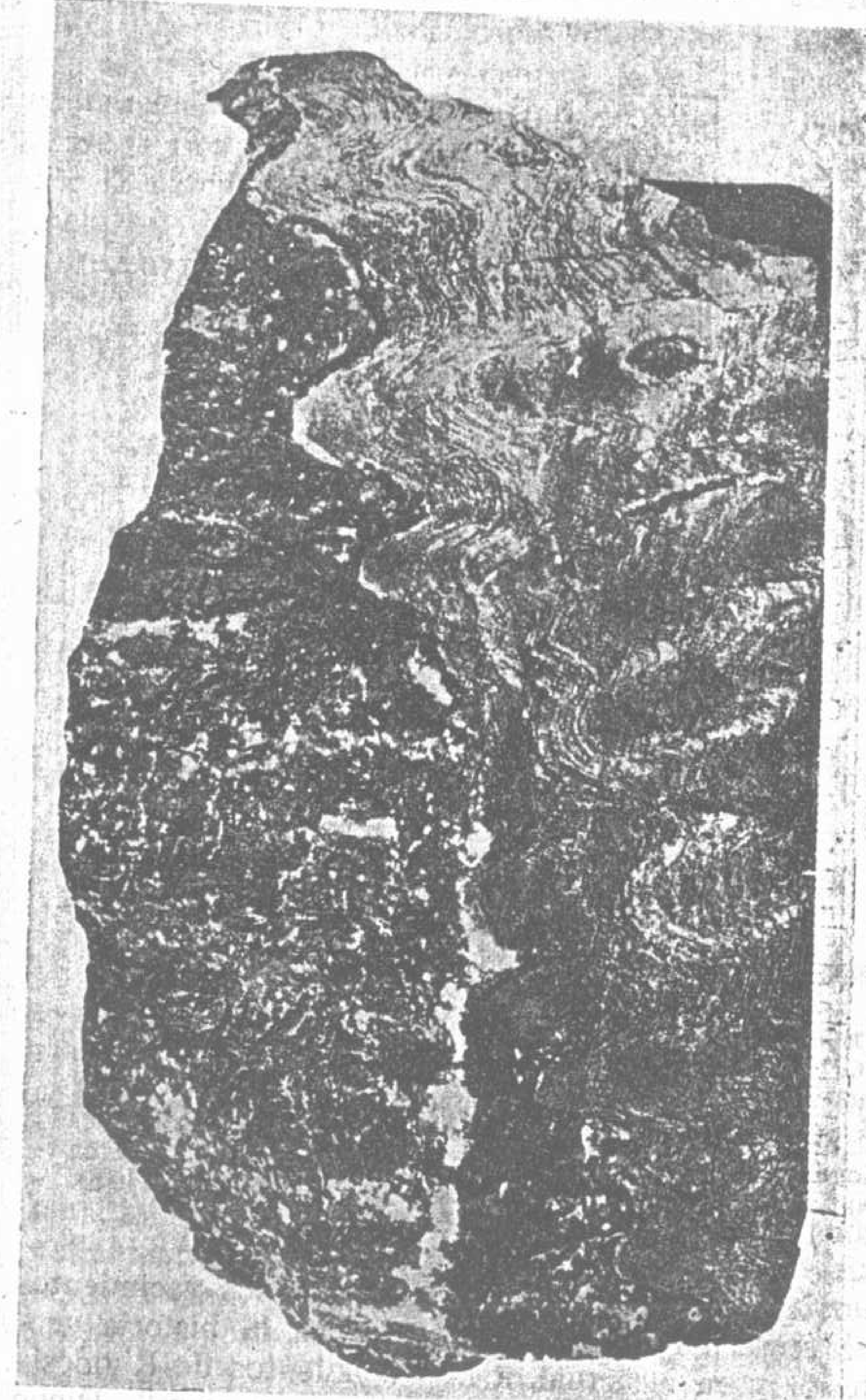


FIG. 18. Superficie pulimentada y preparada con ácidos, procedente de yacimientos biogénicos de calizas precámbricas. Formación dolomítica, cerca de Bulawayo, Rhodesia del Sur (×3/4). La fina estructura laminar en las así denominadas "bandas dentadas" denota deposición biogénica más bien que recristalización inorgánica de caliza (de MACGREGOR, 1940). La escala está graduada en pulgadas.

titución exactamente análoga, y deducir de ese único rasgo su parentesco taxonómico —o clasificativo— de los organismos que formaron esos depósitos.

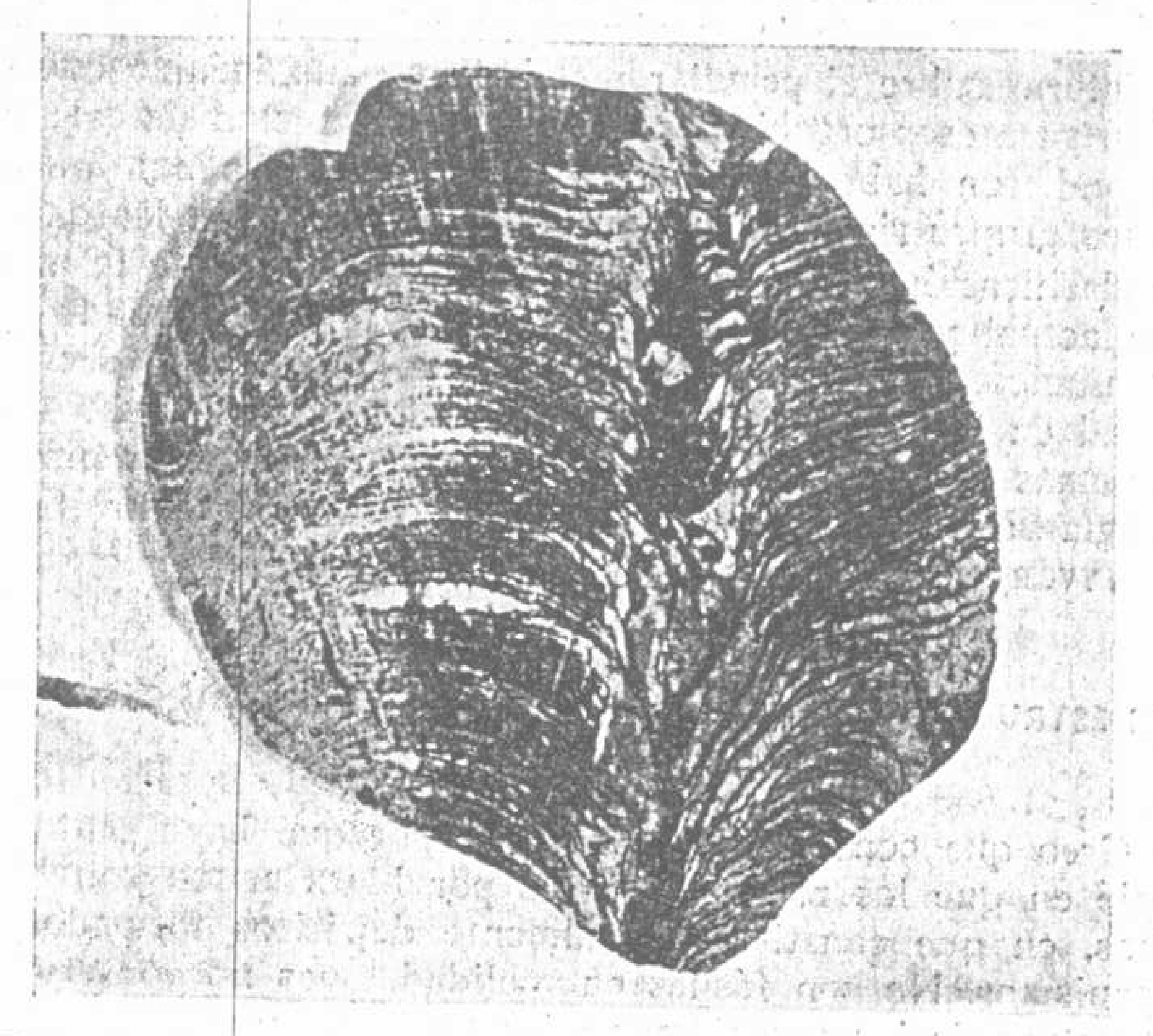


FIG. 19. Preparación delgada de un depósito calizo precámbrico biogénico, serie dolomítica, cerca de Bulawayo, en Rhodesia del Sur (reducido ligeramente) (de MACGREGOR, 1940).

METABOLISMO ANOXIGENICO DE LOS MAS ANTIGUOS ORGANISMOS CONOCIDOS

Basándonos en esta íntima afinidad estructural existente entre los yacimientos de Rhodesia y los yacimientos posteriores tipo "alga", está justificado que deduzcamos que también aquéllos son de origen orgánico y realmente biogénico, pero no nos garantiza ninguna ulterior conclusión con respecto a relaciones taxonómicas o clasificativas, con las formas posteriores, y ni siquiera la designación de formaciones de "algas" está justificada.


FIG. 18. Superficie pulimentada y preparada con ácidos, procedente de yacimientos biogénicos de calizas precámbricas. Formación dolomítica, cerca de Bulawayo, Rhodesia del Sur (×3/4). La fina estructura laminar en las así denominadas "bandas dentadas" denota deposición biogénica más bien que recristalización inorgánica de caliza (de MACGREGOR, 1940). La escala está graduada en pulgadas.

Hace 2 700 millones de años debió existir aún la atmósfera preactualista. Por tanto, los organismos secretantes de caliza de MACGREGOR debieron ser anoxigénicos y, por lo mismo, muy distantes en la escala sistemática de todas las posteriores algas oxigénicas de la atmósfera actual. Sólo nos cabe hacer conjeturas sobre el peculiar metabolismo anoxigénico que permitió ya a esos organismos primeros la secreción de cal; pero no pudieron haber tenido el menor parentesco con ninguno de los grupos sistemáticos en que se reparten, en los cuadros de clasificación, los organismos vivos oxigénicos de la atmósfera actual y sus parientes fósiles. Desde un punto de vista bioquímico, parece que no constituya problema la secreción de cal en los organismos anoxigénicos. Existen incluso varios esquemas de metabolismo anoxigénico capaces de suministrar energía al organismo y segregar cal al mismo tiempo (KLUYVER).

LAS ESTRUCTURAS EN LOS YACIMIENTOS DE CALIZAS BIOGENICAS Y EN LAS INORGANICAS

Creo que conviene aclarar ahora por qué hago tanto hincapié en que los restos descritos por MACGREGOR son biogénicos, en que constituyen realmente depósitos formados por organismos. No son fósiles en realidad, pues no conservan la estructura de los organismos mismos. Hasta podemos suponer que les ocurre, como a las algas más modernas secretantes de caliza, que tales organismos primitivos no tuvieron una estructura morfológica definida, sino que formaban masas más o menos irregulares. Lo que acusa un carácter típicamente biogénico es la fina estructura laminar de estos yacimientos. No sólo se asemeja muchísimo a la estructura de los depósitos calizos formados por algas de tiempos posteriores y por otros organismos, sino que además es totalmente distinta de cualquier otra estructura que pueda desarrollarse en materiales calizos a base de procesos inorgánicos.

También en las calizas pueden constituirse, mediante procesos inorgánicos, estructuras complicadas, bien a raíz de la sedimentación o en periodos geológicos posteriores, mediante disolución, presión u otros factores, sin intervención orgánica ninguna. Pero semejantes estructuras —la más típica de las cuales es la tan conocida "cono-en-cono"— jamás se parecen, ni distantemente, a los depósitos de calizas biogénicas, con su microlaminación tan peculiar, ondulada, regular-irregular. En la serie de las dolomitas de Rhodesia del Sur se encuentran también esas estructuras inorgánicas. Por eso, YOUNG, que presentó un análisis general de las estructuras tipo "alga" de la serie de las dolomitas —YOUNG, 1940 *a*—, describe en un trabajo complementario —YOUNG, 1940 *b*— otras estructuras procedentes de la misma serie, totalmente distintas de las estructuras tipo alga, y que se cree no tuvieron nada que ver con la vida primitiva. No creemos, por consiguiente, que se haya de pensar de cualquier estructura anormal que sea biogénica, y las estructuras descritas por MACGREGOR pasaron por un análisis exhaustivo antes de que fueran representadas y aceptadas como demostración de la existencia de vida, cuya edad podría fijarse por lo menos en los 2 700 millones de años.

LOS FOSILES AUTENTICOS MAS ANTIGUOS

Los fósiles de las plantas primitivas descritos por TYLER y BARGHOORN —1954— se encuentran en la formación ferrífera de Gunflint del periodo Precámbrico del viejo escudo canadiense, en Ontario meridional. Se presentan en pedernales dentro de una serie que contiene mineral de hierro. El pedernal está constituido por concreciones de cuarzo microcristalino, SiO_3. El procedente de la serie Gunflint se usó evidentemente para obtener la chispa en las primitivas carabinas de los tiempos coloniales.

Tales sedimentos silíceos se forman a menudo en ambientes de ciénaga, en los que los ácidos orgánicos procedentes de la vegetación pantanosa acidulan las aguas subterráneas, las cuales a su vez atacan los restos orgánicos animales, calizos o fosfatados, tales como huesos o conchas. En cambio, la celulosa y otras sustancias vegetales son relativamente resistentes a esas aguas ácidas, con lo que pueden fosilizar en este ambiente, mediante un proceso en el que la sílice va sustituyendo molécula a molécula a las sustancias vegetales originales. Manchas minerales, procedentes del material orgánico original, pueden colorear esos fósiles silicificados, de forma que a veces pueden observarse todavía las estructuras originales en sus



FIG. 20. Microfotografía de fósiles silicificados de plantas tipo alga primitivas procedentes de la formación Gunflint, de Ontario, de 1 600 millones de años de edad (×325). Se aprecian dos tipos diferentes: uno formando colonias globulares; otro, filamentos libres sin ramificar (de TYLER y BARGHOORN, 1954).

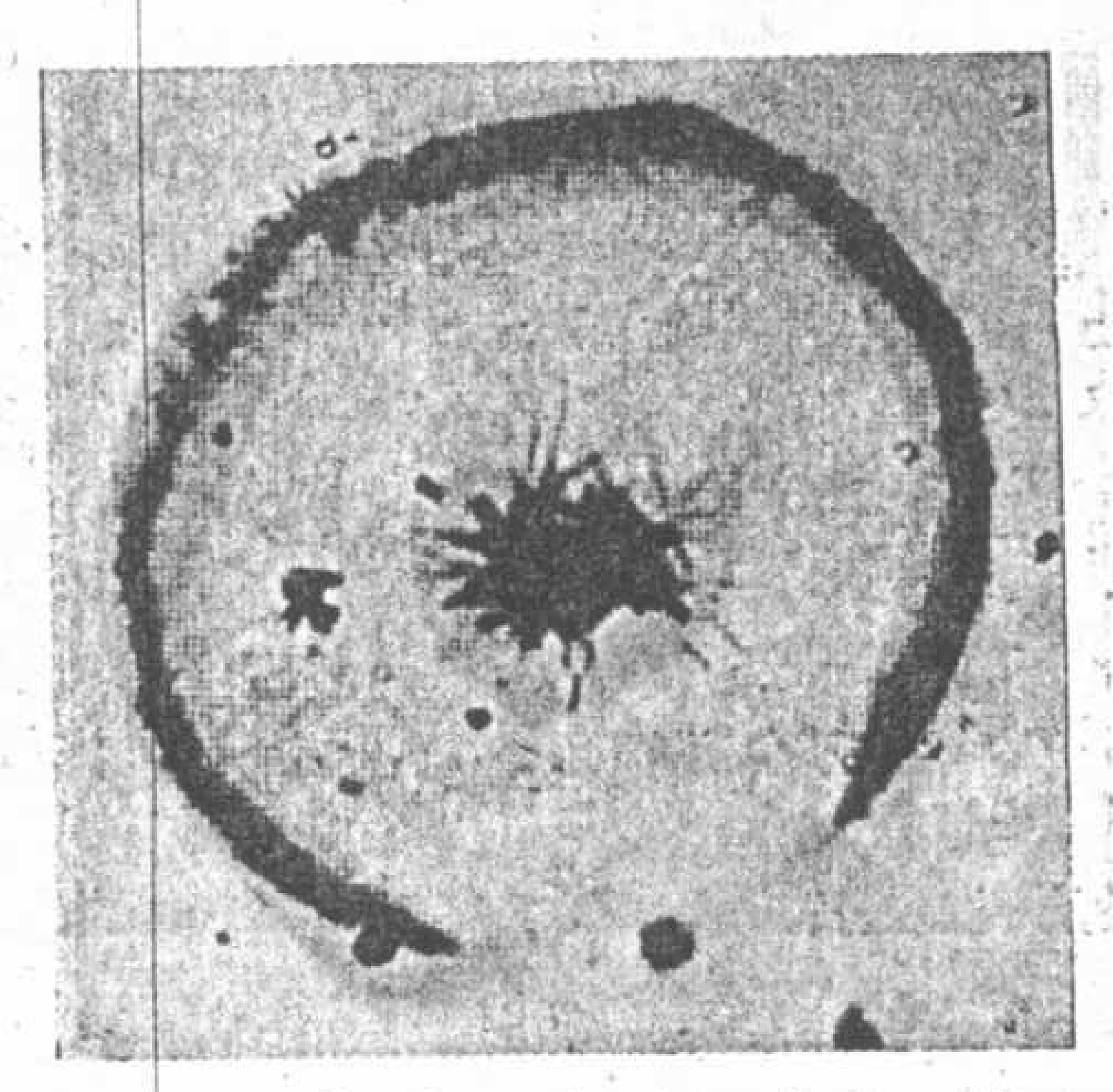


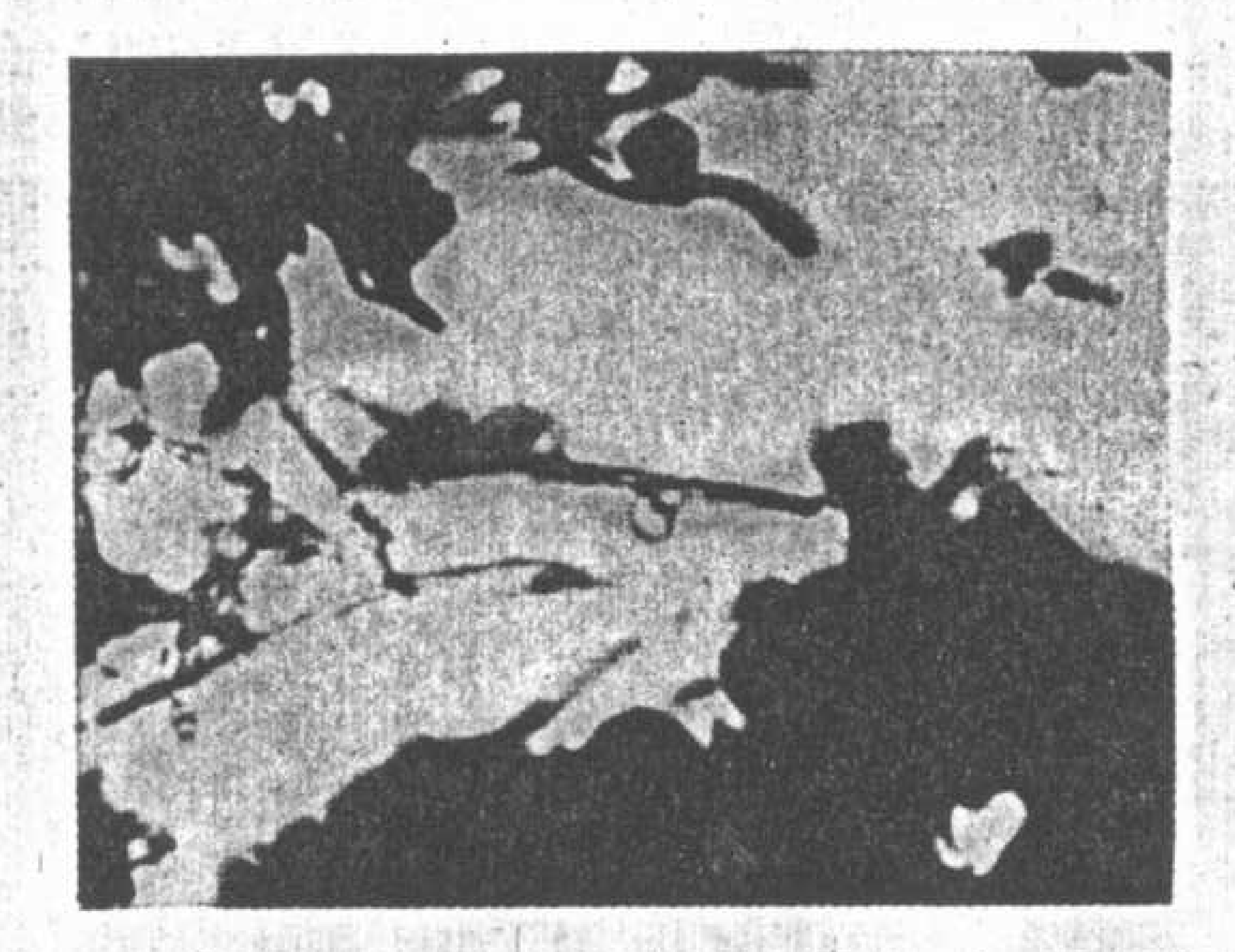
FIG. 21. Microfotografía de una monocolonia globular de plantas algales primitivas. Detalle de la figura 20 (×725) (de TYLER y BARGHOORN, 1954).

más diminutos detalles. Así es como la silicificación nos suministra los restos vegetales más perfectamente conservados. Se conocen, por ejemplo, "maderas silicificadas" procedentes de muchas localidades y muy diversas formaciones geológicas, y con frecuencia se conservan en parques naturales.

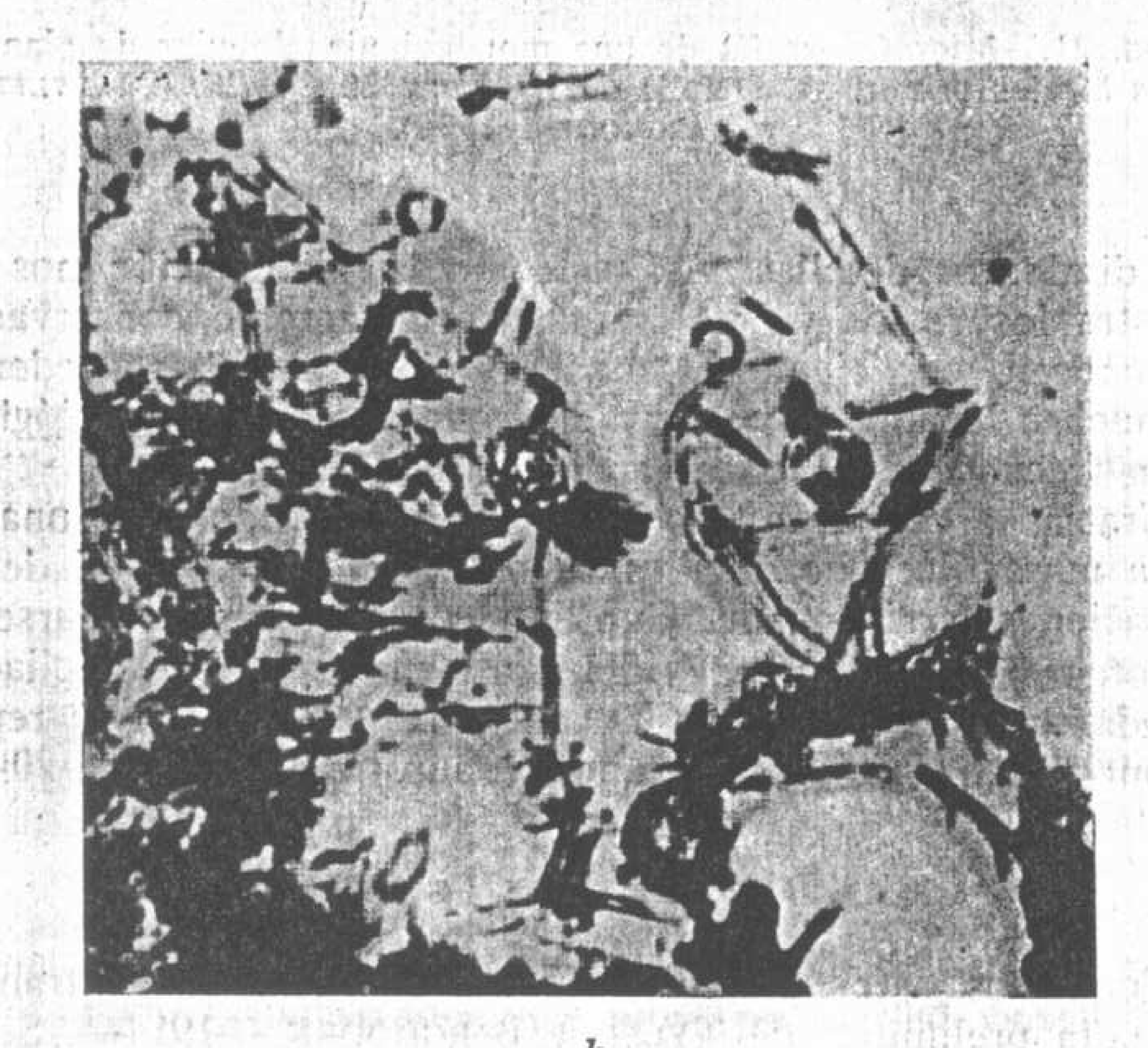
Gracias a esa silicificación se ha conservado, con una riqueza maravillosa de detalles, la primitiva vida vegetal de las formaciones ferríferas del Gunflint, como puede apreciarse en las fotografías de secciones delgadas, enormemente ampliadas, tomadas por los profesores TYLER y BARGHOORN, y que reproducimos aquí mediante su amable autorización (Figs. 20-23).

PLANTAS PRIMITIVAS DE ONTARIO

Todos los datos publicados hasta ahora se encuentran en una nota preliminar de TYLER y BARGHOORN —1954—. Se ha realizado una labor mucho más amplia, que se reseña a fondo en una descripción próxima a aparecer —BARGHOORN, 1962—. Todo aquel a quien interesen estos antiguos fósiles habrá de consultar esta obra, si desea una información más completa, ya que aquí sólo podemos dar una idea general.

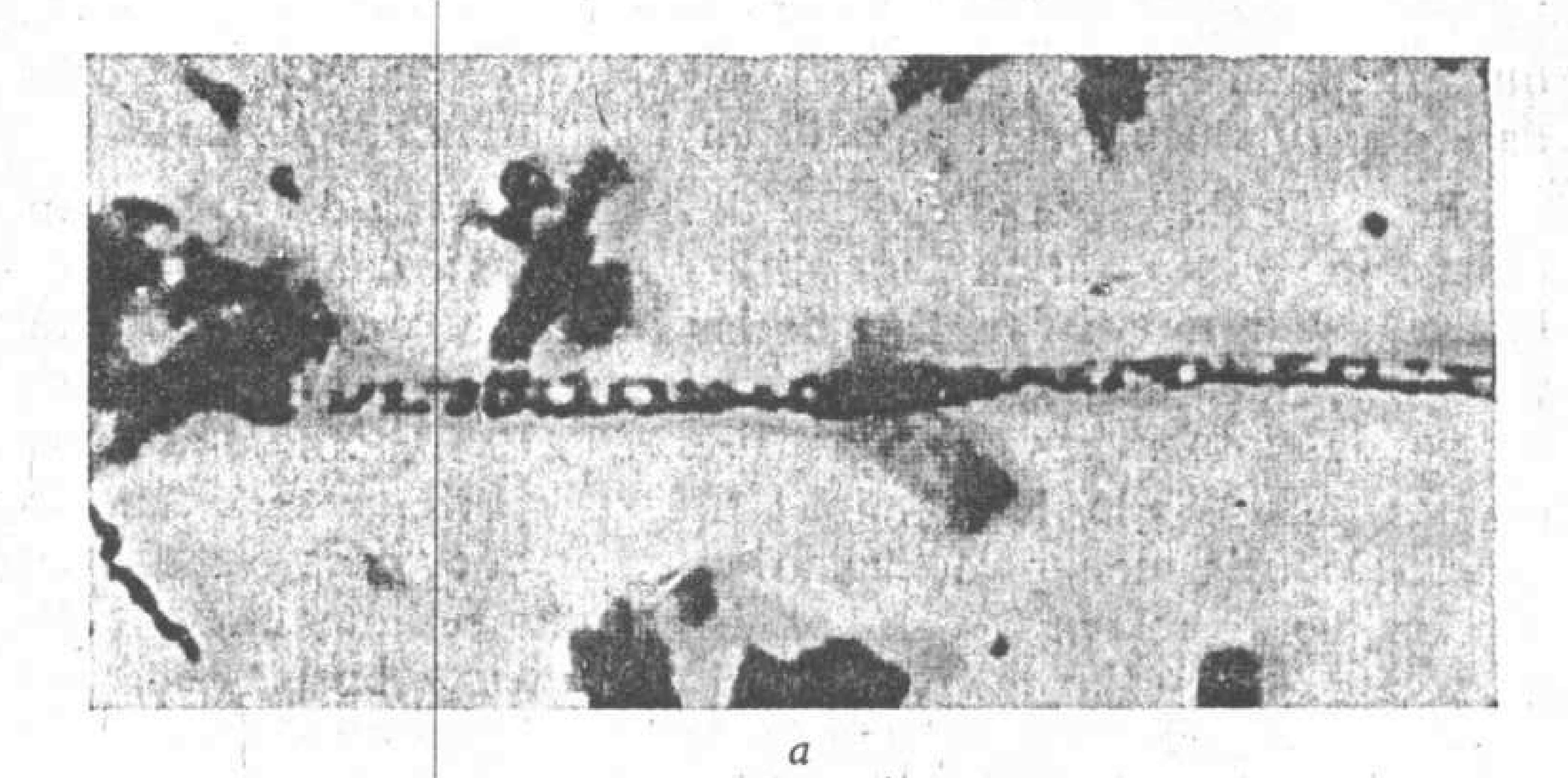


a

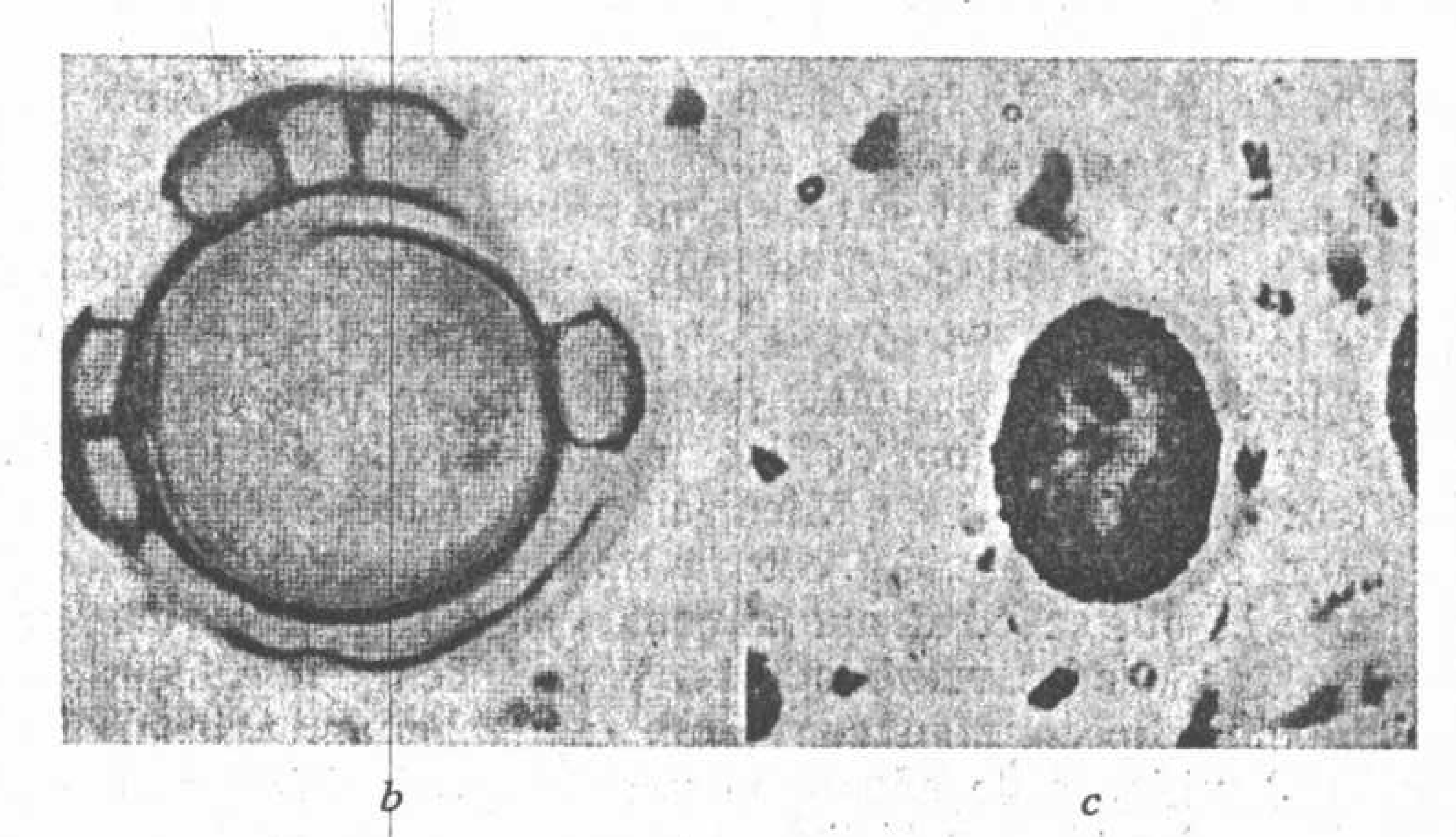


b

FIG. 22. Microfotografías de fósiles silicificados de plantas tipo hongo primitivas, procedentes de la formación Gunflint, Ontario, de 1 600 millones de años de edad. Se ven porciones de micelio y esporas sueltas *a*) y *b*) (*a*×725, *b*×750) (de TYLER y BARGHOORN, 1954).



a



b *c*

FIG. 23. Microfotografía de fósiles silicificados de plantas primitivas procedentes de la formación Gunflint, de Ontario, de 1 600 millones de años de edad; están sumamente ampliadas para que se aprecien pequeños pormenores conservados por la silicificación. Fotografías sin publicar, autorizadas por cortesía de los profesores ELSO S. BARGHOORN y S. A. TYLER (*a*×1 600, *b*×1 500 y *c*×1 800).

Los puntos importantes de los fósiles de Gunflint son: primero, que son auténticos fósiles, es decir, que son restos de organismos que conservan su estructura; segundo, que se hallan restos de diversas plantas totalmente diferentes, lo que demuestra que ya entonces existía una flora diversificada, aun-

que, naturalmente, primitiva, y, finalmente, su gran antigüedad, que se calcula actualmente en 1 600 millones de años.

En el trabajo de TYLER y BARGHOORN de 1954 se han reconocido cinco formas orgánicas distintas: cuatro multicelulares y una unicelular. Dos de las primeras son del tipo alga y las otras dos del tipo hongo. Su forma puede apreciarse mejor por las fotografías adjuntas (Figs. 20-23). Los microbiólogos que han estudiado las láminas delgadas originales están de acuerdo, sin la menor vacilación, en que todos esos ejemplares son realmente restos fosilizados de plantas rudimentarias y de microbios. El hecho asombroso, a mi juicio, consiste en que no sólo demuestran la existencia de la vida en esa época, sino además el alto nivel de diversificación que ya habían alcanzado entonces, en una época que todavía dista mucho del origen, en que toda la vida se componía exclusivamente de microbios, porque existe ya una variedad definida de formas simples, pero de vida vegetal de más elevada organización.

No fué fácil establecer al principio la edad de esos primeros fósiles. En 1954 sólo se disponía de mediciones por helio, y ni siquiera procedentes de la formación misma de Gunflint, en Ontario, sino de las magnetitas de la formación ferrífera de Negaunee en Michigan, que ofrece cierta correlación, un tanto indefinida, con la de Gunflint, y a la que se atribuye la misma edad aproximadamente o un poco más reducida. Las edades suministradas por el helio, que, como es sabido, no ofrecen gran confianza, oscilaban entre los 800 y los 1 600 millones de años, con una media de 1 300 millones. Pero como las plantas fósiles se encontraron cerca de la base de Gunflint, se estimó como probable una edad de unos 2 000 millones de años. Esta es la cifra que recogió y repitió desde entonces la bibliografía, en un afán de hacer que los "fósiles antiguos" fueran lo más viejos posible. Más tarde, los cálculos —no publicados aún— a base del rubidio-estroncio, y obtenidos ya sobre la formación misma de Gunflint, dieron de modo consistente la edad absoluta de 1 600 millones de años; y ésta es la cifra que aceptamos aquí provisionalmente.

Aparte de la edad absoluta de estos fósiles, los más antiguos, tiene también importancia la cuestión de su medio ambiente. ¿Vivieron todavía esas plantas primigenias bajo atmósfera preactualista o pertenecieron ya a las condiciones actuales

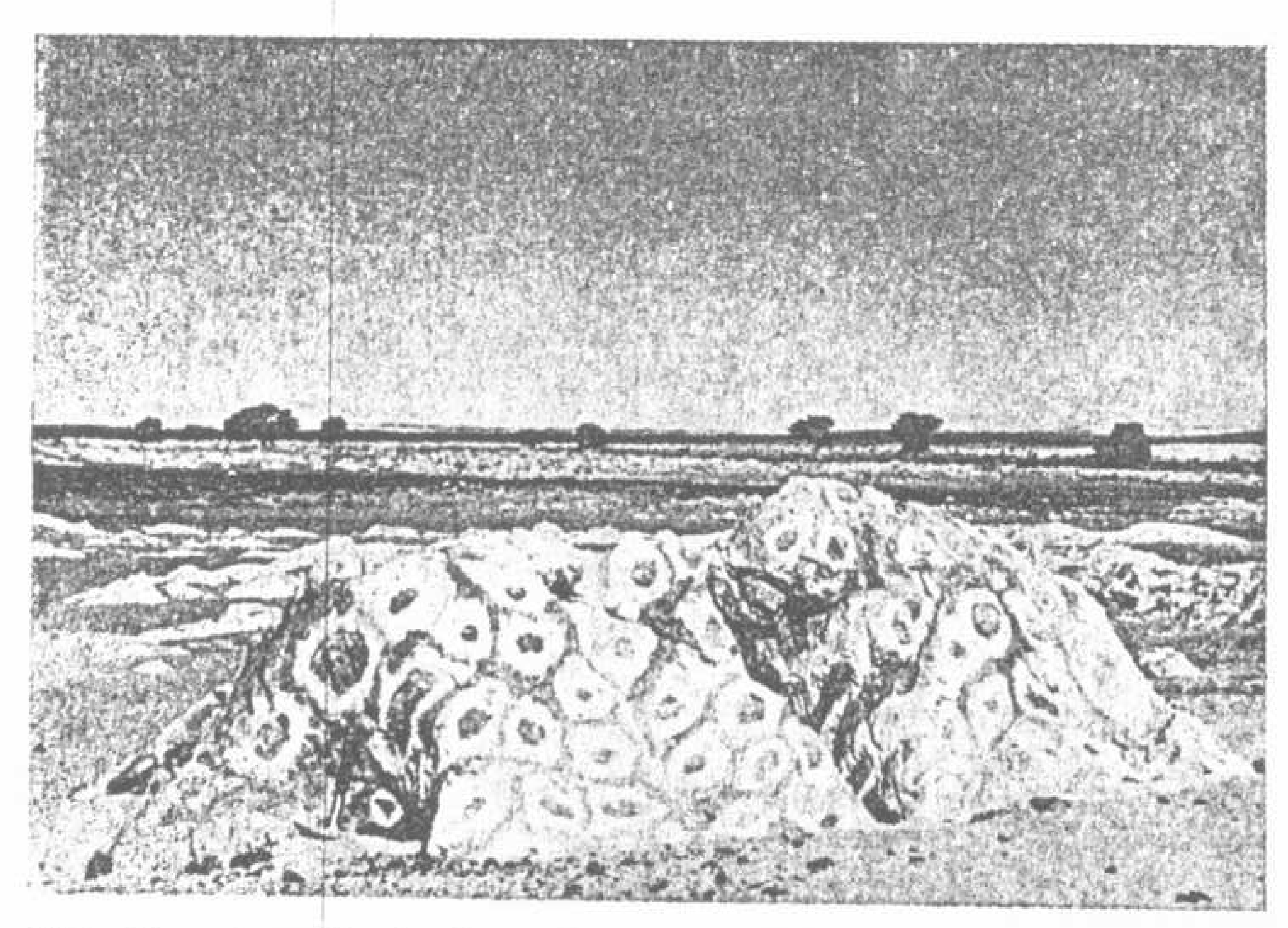


FIG. 24. Arrecife de *Conophyton* en el Pharusiense, Precámbrico del Hoggar, Sahara (de GRAVELLE y LELUBRE, 1945, lámina XXVII).

de vida, desarrollándose bajo una atmósfera oxigénica normal? Esta cuestión no puede ser aclarada en el estado actual de nuestros conocimientos. Como expondremos en el siguiente capítulo, los yacimientos uraníferos del Blind River, que tienen aproximadamente sus dos mil millones de años y que están situados en la misma área general, se formaron todavía bajo condiciones anoxigénicas. Esos 400 millones de años —en números redondos— de diferencia de edades absolutas confirman las correlaciones geológicas anteriores, que parecen indicar también que Gunflint es mucho más joven que Blind River. Por tanto, es muy posible que los fósiles del Gunflint, los más antiguos conocidos, se desarrollasen ya bajo la atmósfera oxigénica. El hecho de que en estas formaciones parecen estar separados los perdernales y el hierro apunta en la misma dirección, según los estudios de LEPP y GOLDICH, que reseñamos en el capítulo siguiente. De momento, lo mejor que podemos hacer es establecer, como conjetura relativamente fundada, que los primeros fósiles conocidos hasta ahora, por ejemplo,

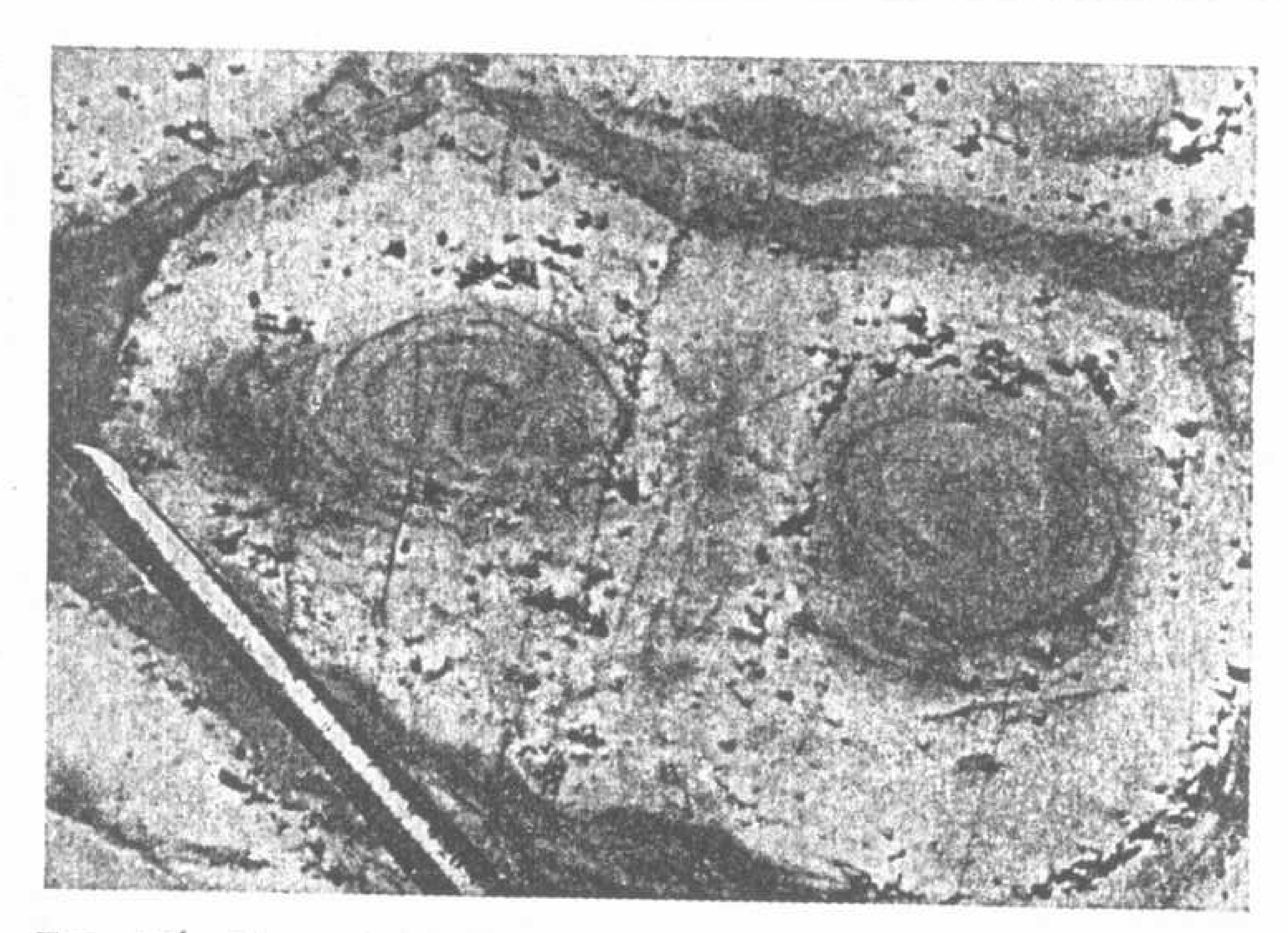


FIG. 25. Vista detallada de dos colonias de *Conophyton* en sección transversal. Pharusiense, Precámbrico del Hoggar, Sahara (de GRAVELLE y LELUBRE, 1954, lámina XXVIII).

las plantas primitivas descritas por TYLER y BARGHOORN, vivieron ya bajo atmósfera oxigénica del tipo de la actual.

ARRECIFES CALIZOS DE ALGAS EN EL SAHARA

Los depósitos biogénicos procedentes del Precámbrico del Africa Central, y descritos, entre otros, por GRAVELLE y LELUBRE, constituyen un feliz complemento de los descritos por MACGREGOR, originarios de Africa del Sur. Se hallan, sobre todo, en el Sahara Central, en el área general del Hoggar. Tampoco son auténticos fósiles, sino costras de piedra caliza depositadas por organismos secretores de cal. Si los comparamos con los depósitos más antiguos de calizas de Africa del Sur, encontramos que aparecen en muchísimo mayor abundancia. Los del Sahara superan con mucho a sus rivales sudafricanos, tanto en número de localidades como en volumen de roca caliza depositada. No se conoce bien la edad de los

yacimientos saharianos, pero probablemente es muy inferior a la de los sudafricanos.

Los restos del Precámbrico sahariano suelen clasificarse entre los estromatolitos, grupo taxonómico artificial que comprende masas de roca caliza, unas veces de forma globular, a veces más bien tubular, que no presentan una clara microestructura, y que se encuentran con frecuencia en colonias de grandes dimensiones. Estas colonias pueden formar arrecifes o, más técnicamente, biohermas. Tales arrecifes son montículos o capas construidas por los mismos organismos, en contraste con los sedimentos corrientes que se han ido depositando o bien en virtud de la gravedad o por secreción debida a procesos químicos. Los arrecifes de algas del grupo de los estromatolitos son las primeras biohermas que conoce la historia de la Geología.

Los más conocidos de esos organismos constructores de arrecifes y secretores de cal, entre el grupo de los estromatolitos, son los *Collenia,* que forman colonias de concreciones calizas globulares de hasta varios decímetros de diámetro cada uno. Además del *Collenia* se encuentran en el Sahara otros restos, pertenecientes al género y forma de los *Conophyton.* En las figuras 24 y 25 reproducimos un ejemplo de un arrecife construido por estos últimos organismos.

Pero la principal importancia del *Collenia* no reside en que constituye la forma que han divulgado los libros de texto como ejemplo de las secreciones primitivas de calizas de algas y de los arrecifes primitivos creados por esos mismos organismos, sino en el hecho de que no se limitan al periodo Precámbrico. Subsisten hasta entrado el Ordovicense. Por consiguiente, es contemporáneo de los tipos primitivos representativos de los principales grupos de la vida moderna.

El hecho de que *Collenia* haya sobrevivido hasta el periodo Ordovicense demuestra que representa las condiciones modernas actualistas de vida. Su metabolismo era oxigénico. En vista de la semejanza existente entre las secreciones calizas de *Collenia* y de otros estromatolitos, no hay lógicamente dificultad en clasificar este grupo entre las algas y en hablar de calizas de algas.

El hecho de que los estromatolitos pertenecen al tipo de atmósfera actual demuestra que son ciertamente mucho más

recientes que sus contrapartidas sudafricanas descritas por MACGREGOR, ya que éstas pertenecían todavía a la atmófera preactual. Pero es difícil determinar las edades que los separan. En realidad, aparte de saber que corresponden al Precámbrico, no tenemos la menor base fidedigna que nos permita calcular la edad de los yacimientos del Sahara. Geológicamente pertenecen a la formación pharusiense, que es a todas luces más reciente que las rocas intensamente metamórficas que constituyen el basamento en el Sahara. Por otro lado, el Pharusiense es claramente más antiguo que las rocas de finales del Precámbrico —que actualmente suelen clasificarse como infracambrianas, por pertenecer a la misma serie litológica que las cámbricas—. Según estas ideas, se opina que el Pharusiense pertenece al Precámbrico medio. Pero salta a la vista que esta clasificación resulta vaguísima, y que se basa exclusivamente en técnicas de correlación y de cronometría relativa, que no suministran una base para edades absolutas.

Por eso no se puede aceptar la teoría de FURON —1960—, que atribuye una edad de dos mil a tres mil millones de años al Precámbrico medio del Sahara. Esta edad no se fundamenta en cantidad suficiente de edades absolutas. Incluso en el caso de que algunos elementos de esa serie de rocas sumamente diferentes, agrupadas bajo la etiqueta general de pharusianas, fueran en realidad tan viejas, ciertamente no es la que corresponde a las calizas recristalizadas con arrecifes de *Collenia* o *Conophyton*. Estas deben ser posteriores a los dos mil millones de años, puesto que representan la vida moderna, de tipo actualista.

En conclusión, los yacimientos biogénicos precámbricos de *Collenia* y *Conophyton* del Sahara tienen menos de dos mil millones de años, pero ni siquiera podemos atribuirles una edad mínima, fuera del dato de que son anteriores a los últimos tiempos precámbricos. Su edad probable está comprendida entre los mil y los dos mil millones de años. Dadas las muchas localidades del Africa Central en que se encuentran tales restos de *Stromatolites*, sería muy importante que pudiésemos contar con datos más fidedignos para fijar su edad absoluta.

PERSPECTIVAS OPTIMISTAS

Una vez que hemos estudiado con alguna detención los tres tipos de restos más importantes de la vida primitiva en la Tierra, creo conveniente cerrar este capítulo con una nota optimista. A pesar de la penuria indudable de restos geológicos de vida primitiva, éstos no dejan, sin embargo, lugar a duda de que en los albores de la historia de la Geología existía ya la vida en nuestro Globo. Más aún, hemos visto que la había ya bajo la atmósfera primitiva, preactualista, anoxigénica. Lo que da peso a las teorías especulativas de biólogos y astrónomos, según las cuales, todo el oxígeno libre actual es de origen biogénico.

Así es que, aunque los restos de vida primitiva encontrados hasta ahora son escasos, son muy reveladores; y a pesar de su reducido número, nos han enseñado muchas cosas sobre la vida primitiva en la Tierra. Durante los dos últimos decenios han avanzado mucho nuestros conocimientos.

Por otra parte, era de esperar esa escasez de restos de la vida primitiva sobre la Tierra. Las primeras manifestaciones vitales debieron ser en gran parte micróbicas y, por lo mismo, de muy difícil fosilización. Además, las rocas de tan viejas edades generalmente o se transforman por el metamorfismo hasta hacerse irreconocibles o quedan soterradas bajo la cobertura de rocas de más reciente formación. Con todo, se está desarrollando a grandes marchas el estudio de los escudos. Por eso no parece ningún exceso de optimismo el esperar que un futuro próximo nos reserve mucha más información sobre este tema y que en las próximas décadas se avance, por lo menos, tanto como se ha avanzado en los dos últimos decenios.

CAPITULO 8

El medio ambiente

METEORIZACION DE LAS ROCAS

Aparte de los hallazgos positivos de restos fosilizados, la Geología puede averiguar también cuáles fueron las condiciones reinantes en un periodo dado en la superficie terrestre. Es decir, que en los casos en que se han conservado datos suficientes sobre los que basar alguna conclusión, la Geología puede averiguar si existió posiblemente en los tiempos primitivos una atmósfera reductora, atmósfera totalmente diferente de la atmósfera actual oxidante, tal como postulan biólogos y astrónomos.

Como indiqué antes, esto es posible porque una atmósfera tan diferente no sólo había de afectar al modo de vida, sino también a los procesos químicos que se desarrollasen en la superficie terrestre. Semejante atmósfera reductora debería haber influido de manera sensible en todos los procesos exogénicos contemporáneos.

Los procesos exogénicos que tienen más importancia para nuestro tema son los incluidos en esta cadena: meteorización-erosión-transporte-sedimentación. Según sean las características locales de la serie erosión-transporte-sedimentación, tales como velocidad de transporte, de sedimentación en depresiones o en océanos, la meteorización puede actuar también en las fases finales de esta cadena. Para determinar el carácter de la atmósfera primitiva, es de capital importancia el tipo de meteorización de aquellas épocas. La influencia de los restantes procesos exogénicos sirve más o menos de fondo al escenario de las acciones atmosféricas.

Antes de poder penetrar más profundamente en los efectos de meteorización es preciso hacer una breve digresión y pasar revista a la composición de las rocas de la corteza terrestre, pues ésta entra ahora a formar parte de nuestro estudio. Los elementos más corrientes de la corteza son: silicio, Si; aluminio, Al, y oxígeno, O. La mayor parte de los minerales que forman la corteza son compuestos de esos elementos: bien sea el óxido de silicio, silicio o cuarzo, SiO_2; bien sean los silicatos compuestos de Si, O y Al. A los silicatos compuestos suelen incorporarse los metales de base, Ca y Mg; los alcalinos, K y Na; metales, como el Fe, y, por supuesto, los aniones, H, y los halógenos, S; y así sucesivamente.

Los silicatos que contienen sólo álcalis y Ca, combinados con aluminio y sílice, forman generalmente feldespatos de coloridos claros. Los minerales oscuros, como la biotita, la augita y la hornablenda, contienen también hierro, magnesio y otros metales. Los tres grupos de cuarzo, feldespatos y minerales oscuros componen conjuntamente la mayor parte de todas las rocas de la corteza terrestre. También se dan agregados minerales, sobre todo en las rocas plutónicas y en sus filones afines, que suelen contener minerales sulfurosos, como piritas, FeS, y óxidos metálicos, como la magnetita, Fe_3O_4. En general, los sulfuros son minerales de temperatura baja de formación; los óxidos se constituyen a temperatura mucho más elevada.

Volviendo ahora a la acción de la atmósfera sobre las rocas aflorantes en la superficie de la Tierra, encontramos que meteoriza las rocas corticales siguiendo un doble proceso: físico y químico. La acción puramente física es rara. Se la encuentra, por ejemplo, en los climas extremos: o extremadamente fríos o extremadamente cálidos y secos; en las tundras y en los desiertos. En el clima de frío intenso, las rocas se desintegran por la acción resquebrajante de las heladas; en el desierto, por los ardores del Sol. Por lo demás, la atmósfera actúa químicamente, y estos fenómenos constituyen la principal actividad de ataque de las rocas de la corteza.

MINERALES INESTABLES BAJO LA METEORIZACION ACTUAL

La acción química climatológica, dadas las circunstancias de nuestra atmósfera actual oxidante, ataca a todos los minerales, excepto los óxidos. Lo mismo a los feldespatos y minerales oscuros corrientes de rocas normales que a los sulfuros de las vetas minerales y filones, los cuales se oxidan bajo su acción, formando compuestos solubles. Por consiguiente, sólo quedan intactos los óxidos: el cuarzo común y los otros óxi-

dos, mucho más raros, como la magnetita. Las soluciones portantes del material sustraído a los feldespatos, minerales oscuros y sulfuros son acarreadas por los ríos a las tierras bajas y a los océanos. Allí, generalmente bajo el nivel de aguas, y con frecuencia sin contacto con el oxígeno libre, se forman nuevos compuestos. Estas nuevas combinaciones pertenecen predominantemente al grupo de los minerales arcillosos.

Tal es, reducido a su expresión más esquemática, el proceso normal de fenómenos: meteorización-transporte-sedimentación, según tiene lugar en nuestra atmósfera actual oxidante. Pero incluso expresado en forma tan esquemática, ilustra suficientemente los puntos que interesan para nuestro estudio, a saber: que todos los minerales, a excepción de los óxidos, son vulnerables a la acción química atmosférica, y, además, que los iones procedentes de esta acción química atmosférica sobre los silicatos y sulfuros, una vez acarreados a las zonas de sedimentación, pueden recombinarse para formar minerales arcillosos.

Esta es la razón de que sólo existan actualmente tres tipos fundamentales de sedimentos: arenosos, arcillosos y calizos. Las arenas son exclusivamente partículas de cuarzo, residuos de la acción química de la atmósfera, aunque acaso hayan sido transportadas y resedimentadas varias veces. Las arcillas son de nueva formación debidas a la recombinación de los iones desligados de los silicatos por la acción química atmosférica. El material carbonático de las calizas es de origen principalmente biógeno, derivado de las conchas animales.

Sólo en circunstancias excepcionales se verá, por ejemplo, que la arena contenga feldespato en cantidad apreciable. Esto ocurre cuando se depositan detritus de rocas ígneas en localidades muy próximas a su zona de origen y cuando, además, quedan rápidamente soterrados, evitando así la acción ulterior química de la atmósfera. Todavía es más raro encontrar hoy día sulfuros en las arenas, ya que no sólo meteorizan más rápidamente, sino que además constituyen fácil presa de las bacterias sulfurófilas mediante acción bioquímica. Se dan algunos casos en las zonas altas de las tundras, donde el clima tan tremendamente frío impide la erosión química, y también en el valle del Indo, de tan rápido hundimiento, en que los sedimentos más recientes cubren tan rápidamente los anteriores, que los protegen eficazmente de la acción del aire, impidiendo su ulterior acción. Estas excepciones, por ser tan raras y por requerir unas condiciones ambientales sumamente extremadas, sólo sirven para subrayar con más intensidad la regla general, a saber: que normalmente, bajo nuestra actual atmósfera oxidante, todas las arenas son de cuarzo; los únicos minerales estables son los óxidos.

MINERALES ESTABLES BAJO ATMOSFERA ANOXIGENICA

Nada de esto ocurriría bajo una atmósfera primitiva de carácter reductor. Allí los feldespatos, los minerales oscuros y los sulfuros podrían permanecer por mucho más largo tiempo en la superficie terrestre antes de terminar desintegrándose. Hasta podrían verse implicados en un nuevo ciclo de erosión-transporte-sedimentación; cuando, por ejemplo, su zona original de sedimentación se viese atacada por la erosión a consecuencia de cualquier ligero movimiento de la corteza, o de cambios de curso de los ríos, o de descensos en el nivel del mar. Se verían mucho más afectados por la acción mecánica de la atmósfera y mucho menos por su acción química. Como resultado de ello, con la repetición de los ciclos erosión-transporte-sedimentación se irían redondeando sus granos y clasificando por sus tamaños y sus pesos específicos, dentro de una gran variedad.

Bajo semejante atmósfera reductora sería de esperar que se formasen arenas de todas clases de composición: arenas más bastas y más finas de los minerales más ligeros, como de cuarzo y de feldespato —no cuarzo sólo—, o arenas de minerales de peso medio, como la hornablenda y la augita. Pero también arenas de minerales pesados, como sulfuros y metalóxidos. El tamaño, la forma, el peso específico de cada grano, o sea sus propiedades físicas, son las que determinarían su lugar definitivo de sedimentación, no sus propiedades químicas.

ESTUDIOS DE RANKAMA: DETRITUS DE LOS GRANITOS

El primer intento de aprovechar científicamente la diferencia que presentan los procesos exógenos, según se produzcan en atmósfera oxigénica o anoxigénica, lo llevó a cabo RAN-

KAMA —1955— en Finlandia. Probó a determinar la naturaleza de la atmósfera estudiando un antiguo yacimiento de rocas detríticas en torno a un asomo granítico, del que se creía procedían los sedimentos. Aquel cuerpo granítico —en realidad, una cuarzo-diorita— contenía un 4 por 100 de hierro ferroso y un 2 por 100 de férrico, medido por el peso de sus óxidos. Ahora bien, en una atmósfera de acción oxidante, la cantidad relativa de hierro férrico en los sedimentos procedentes de granito debería ser mayor, debido a la oxidación del hierro ferroso. Pero en el caso de Finlandia no ocurre así, sino que la razón Fe_2O_3/FeO es todavía más baja en los sedimentos que la que existe en un canto natural de diorita incrustado en los sedimentos, y es comparable a la proporción en que se encuentran en las cuarzo-dioritas de las proximidades (tabla V).

TABLA V

Contenido (porcentaje en peso) ferroso y férrico en los cuarzos-dioritas y en sus sedimentos derivados correspondientes al periodo Precámbrico medio cerca de Tampere, en Finlandia

(Tomado de RANKAMA, 1955)

	Guijarro de diorita de cuarzo	*Dioritas de cuarzo*					
Fe_2O_3	1,98	0,79	0,61	0,75	1,46	0,50	1,09
FeO	3,67	6,70	4,06	6,23	7,99	4,35	5,65
Fe_2O_3/FeO	0,54	0,12	0,15	0,12	0,18	0,11	0,19
				Sedimentos derivados			
Fe_2O_3		0,16	1,73	0,49	0,65	1,43	
FeO		2,94	5,19	5,06	6,31	6,71	
Fe_2O_3/FeO		0,05	0,33	0,10	0,10	0,21	

RANKAMA llegó a la conclusión de que, en este caso concreto, la diorita de cuarzo estuvo expuesta a la acción de una atmósfera reductora. Esto nos suministraría una edad concreta

para la existencia de una atmósfera anoxigénica primitiva, en el caso de que pudiera establecerse la edad de los sedimentos.

Sin embargo, se está prestando muchísima atención actualmente a la estratigrafía precámbrica del antiguo escudo fenoscándico, y la cronometría absoluta tiende a invertir muchas de las correlaciones anteriores. La cuarzo-diorita y los sedimentos derivados de ella, estudiados por RANKAMA, fueron incluidos al principio en el periodo Botniano. Se creía que éste fue algo anterior al periodo Suecofénnico, al que se le asignaba la edad de unos 1 800 millones de años. Hoy día hay quien agrupa dentro de un mismo periodo el Botniano y el Suecofénnico, considerando entonces que esos 1 800 millones de años de edad corresponden a un metamorfismo posterior, y no a la edad real de las rocas. Sin duda que en un próximo futuro se podrá disponer de más hechos. Mientras tanto, y a título de tanteo, pueden asignarse provisionalmente unos dos mil millones de años de edad a los procesos atmosféricos reductores de Finlandia, descritos por RANKAMA.

Pero aún queda abierto a la discusión el aserto de RANKAMA de que tales antiguos sedimentos proceden realmente de ese preciso bloque granítico de cuarzo-diorita, cuya abundancia en hierro ferroso y férrico armoniza tan bien con la de las pizarras circundantes. Hay muchos granitos en aquella zona y los sedimentos envolventes presentan un metamorfismo regional, por lo que resulta bastante difícil establecer una relación inequívoca entre la roca granítica y los sedimentos metamórficos. Con todo, el estudio de RANKAMA ha indicado el camino a seguir para calcular las propiedades de la atmósfera terrestre al tiempo de la sedimentación de determinados elementos, mediante el estudio de esos sedimentos antiguos. RAMDOHR, el especialista alemán en minerales, amplió posteriormente las ideas de RANKAMA, siguiendo estudios totalmente independientes; aunque utilizó material distinto por completo, ambos investigadores se basaron en el mismo punto de partida básico.

ESTUDIOS DE RAMDOHR: ARRECIFES DE ORO-URANIO

RAMDOHR describe en un trabajo —1958— unos yacimientos antiguos del Precámbrico, situados en los antiguos escudos de Africa del Sur, Brasil y Canadá, que tienen importancia

económica por su contenido en oro-uranio. Pero aparte totalmente de su interés económico, tienen un significado especial de carácter más general, debido a estar formados por arenas y gravas antiguas. Representan sedimentos depositados en la superficie de la Tierra mediante proceso exogénico. Por consiguiente, tuvo que influir en su composición la de la atmósfera contemporánea. Estos yacimientos están formados no sólo por granos de cuarzo, sino también por sulfuros y por pechblenda. Actualmente la pechblenda es un mineral complejo que presenta una composición comprendida entre UO_2 y U_3O_8. Pero esto se debe a la oxidación posterior. Originariamente estaba constituida la uraninita por el mineral de uranio UO_2, que es el menos oxidado de los óxidos de uranio. Los yacimientos de Africa del Sur son arrecifes auríferos que ya se explotaban por su contenido en oro, pero que han adquirido un apreciable valor adicional por la presencia del uranio. Los yacimientos del Brasil y del Canadá, aunque están formados por arrecifes muy semejantes, contienen tan poco oro, que sólo últimamente adquirieron importancia económica como menas de uranio. Los yacimientos descritos por RAMDOHR pertenecen a los siguientes distritos: Witwatersrand y Dominion Reef, en Sudáfrica; Serra de Jacobina, en Bahía, Brasil, y Blind River, en Ontario, Canadá. Así que varía muchísimo su posición geográfica; pero no es menor la diferencia de edades, como veremos.

A pesar de la distancia geográfica y de la diferencia de edades, presentan una composición sorprendentemente análoga; tan parecida, que muchas veces los expertos no aciertan a distinguir las muestras de un paraje de las de cualquiera de los otros tres. Por supuesto que la composición mineral varía mucho de una capa a otra. También pueden darse variaciones laterales —dentro de una misma línea horizontal— por lo que se refiere a la abundancia relativa de los minerales constitutivos. Pero, de todas maneras, el cuadro general es de una coherencia notable. Todas las variantes oscilan dentro de unos mismos límites perfectamente definidos. Y, lo que es más importante, ese cuadro general —tan sorprendentemente parecido en esos yacimientos antiguos, a pesar de las grandes distancias que los separan en el espacio y en el tiempo— contrasta vivamente con el que presentan todos los yacimientos más

recientes de grava y arena pertenecientes a etapas posteriores de la historia de la Tierra.

ARENAS CON PIRITAS, PECHBLENDA Y OTROS MINERALES

Los yacimientos están constituidos por conglomerados antiguos de cuarzo y por arenas, también de cuarzo, consolidadas en rocas durísimas que forman los denominados arrecifes. Pero además del cuarzo encierran pirita, FeS, ilmenita, $FeTiO_3$ y pechblenda —primordialmente UO_2— en cantidades considerables.

Presentan todos los rasgos característicos de yacimientos depositados originariamente como gravas y arenas superficiales. Forman placeres. La forma redonda de cada grano, su buena clasificación, sus tamaños, las diferencias de composición mineral y de tamaños entre capas sucesivas, son características que se encuentran en todos los bancos de gravilla y arena depositados superficialmente en los ríos y lagos, y no se los puede explicar con ningún otro proceso de sedimentación.

En esos yacimientos antiguos, que contienen granos de composición tan diferente y, por lo mismo, de peso específico distinto como son el cuarzo, la pirita y la pechblenda, es curioso ver cómo dentro de una misma línea horizontal los granos más ligeros, los de cuarzo, son siempre mucho mayores que los granos más pesados de pirita, y cómo, a su vez, los granos de pechblenda, mucho más pesados, son con mucho los más pequeños. Este es uno de los casos más ejemplares de ajuste y clasificación de granos por tamaño, peso y propiedades físicas que nos ofrece la Geología.

RAMDOHR aduce además pruebas de erosión de las capas más antiguas de estas arenas y gravillas arcaicas y de resedimentación de fragmentos, procedentes de más viejos estratos clásticos, en capas más jóvenes. Así se encuentran cantos rodados procedentes de bancos primitivos redepositados entre granos sueltos en capas más recientes.

Existe una semejanza impresionante entre el modo de deposición, reelaboración y redeposición de estas antiguas gravillas y arenas y los cauces de erosión contemporánea de los antiguos ríos, los bancos mucho más recientes de grava y arena

y otros ejemplos de los últimos tiempos. Sólo hay una diferencia, y por cierto capital, a saber: que todas las gravas y arenas más recientes sólo contienen cuarzo, mientras que en esos yacimientos antiguos encontramos grandes cantidades de granos de sulfuros, pechblenda y otros minerales, junto con los granos de cuarzo. Minerales que no son estables bajo la actual atmósfera oxigénica.

En las figuras 26-32 puede ser estudiada la estructura de estos arrecifes. Los ejemplares de las figuras 26 y 27 proceden, respectivamente, de antiguas arenas de Witwatersrand, con una antigüedad de 1 800 millones de años, y de unas arenas negras recientes de la costa norte de Buenos Aires. La arena antigua consta principalmente de pirita, FeS, y la reciente, de magnetita, Fe_3O_4, minerales ambos que tienen pesos específicos parecidos. La semejanza estructural salta a la vista. Pero hoy la arena de pirita sería inestable, mientras que la de magnetita, compuesta de óxido de hierro, es estable bajo la actual atmósfera oxigénica.

La arena de la figura 28 procede también de los viejos bancos de Witwatersrand y está constituida principalmente por cuarzo y pirita. También apreciamos en este grabado gran cantidad de sulfuro en comparación con el cuarzo. Los granos de pirita constituyen una minoría nada despreciable, como ocurre con los "minerales pesados" de las arenas recientes, y representan uno de los constituyentes principales. Además, en la cara superior se encuentra un fragmento redepositado de un conglomerado más antiguo. Todavía se aprecian débilmente los bordes redondeados de los granos más antiguos, cementados en el trozo del conglomerado anterior.

En la figura 29 se aprecia su ritmo de sedimentación, comparable en todos los aspectos a los que se pueden observar en las arenas y gravilla recientes. Encima de una capa de granos de cuarzo yace una franja delgada compuesta de granos de pirita y de pechblenda. Los límites entre los granos individuales de cuarzo no se aprecian ya en la reproducción. Sin embargo, esos granos son mucho mayores que los de pirita, mientras que los de pechblenda no sólo son los más menudos, sino que además manifiestan una clasificación estricta de tamaño.

También se encontraron indicios de la presencia de vida

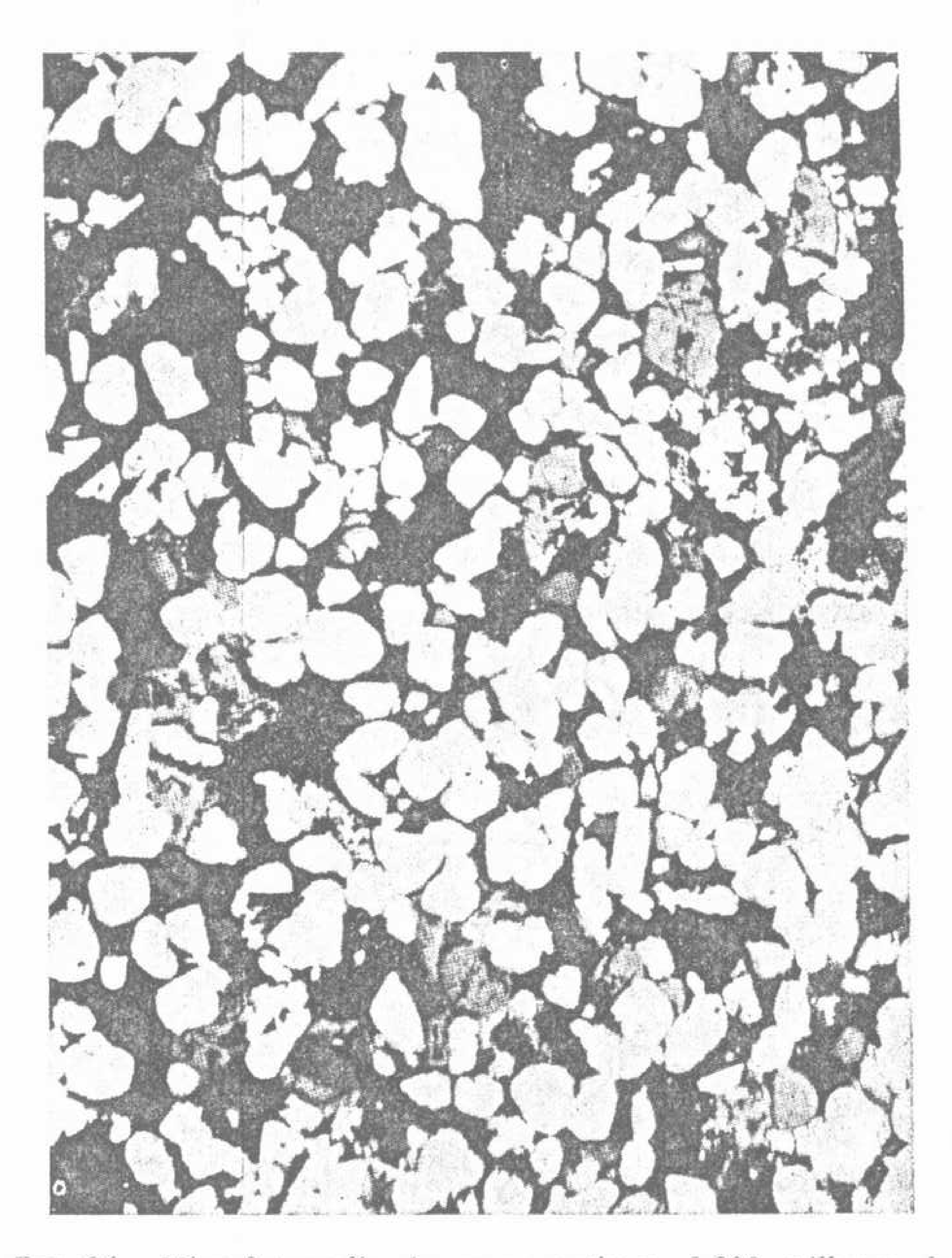


FIG. 26. Microfotografía de arena antigua—1 800 millones de años—, de Witwatersrand, de Sudáfrica (×70). Blancos: granos de pirita. Grises: granos de diversos óxidos. Oscuros: granos de cuarzo (de RAMDOHR, 1958).

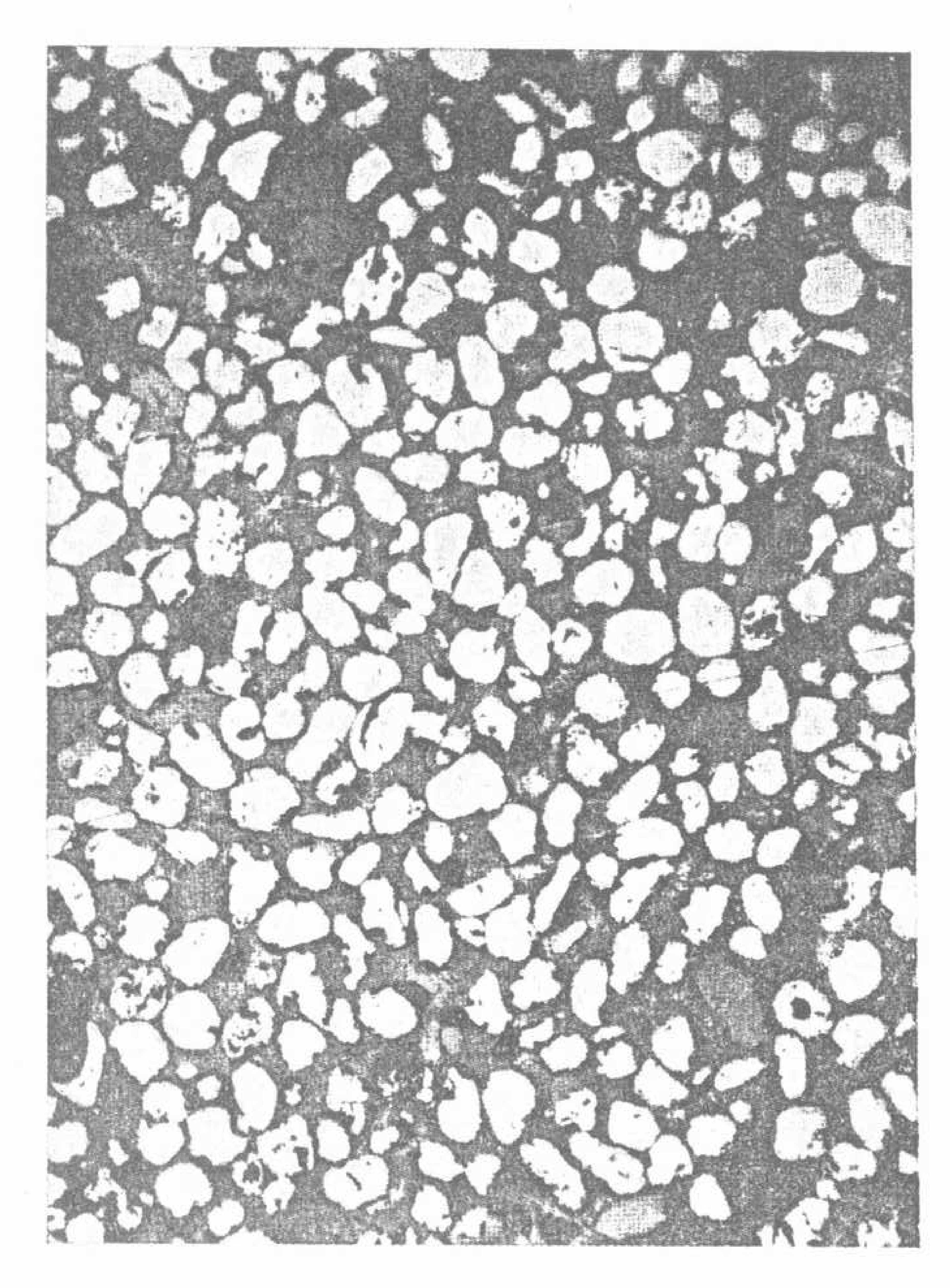


Fig. 27. Microfotografía de arena reciente de una costa en la Argentina (×45). Granos blancos de magnetita. Compárese con la estructura de la antigua arena de pirita de la figura 26 (de Ramdohr, 1958).



Fig. 28. Microfotografía de una vieja arena de cuarzo-pirita, Witwatersrand, Sudáfrica (×45). Blancos: granos de pirita. Oscuros: granos de cuarzo. Arriba: terrón de conglomerado de pirita, más antiguo, depositado por segunda vez. Aún pueden apreciarse los bordes redondeados de los granos originales de pirita dentro del conglomerado antiguo (de Ramdohr, 1958).

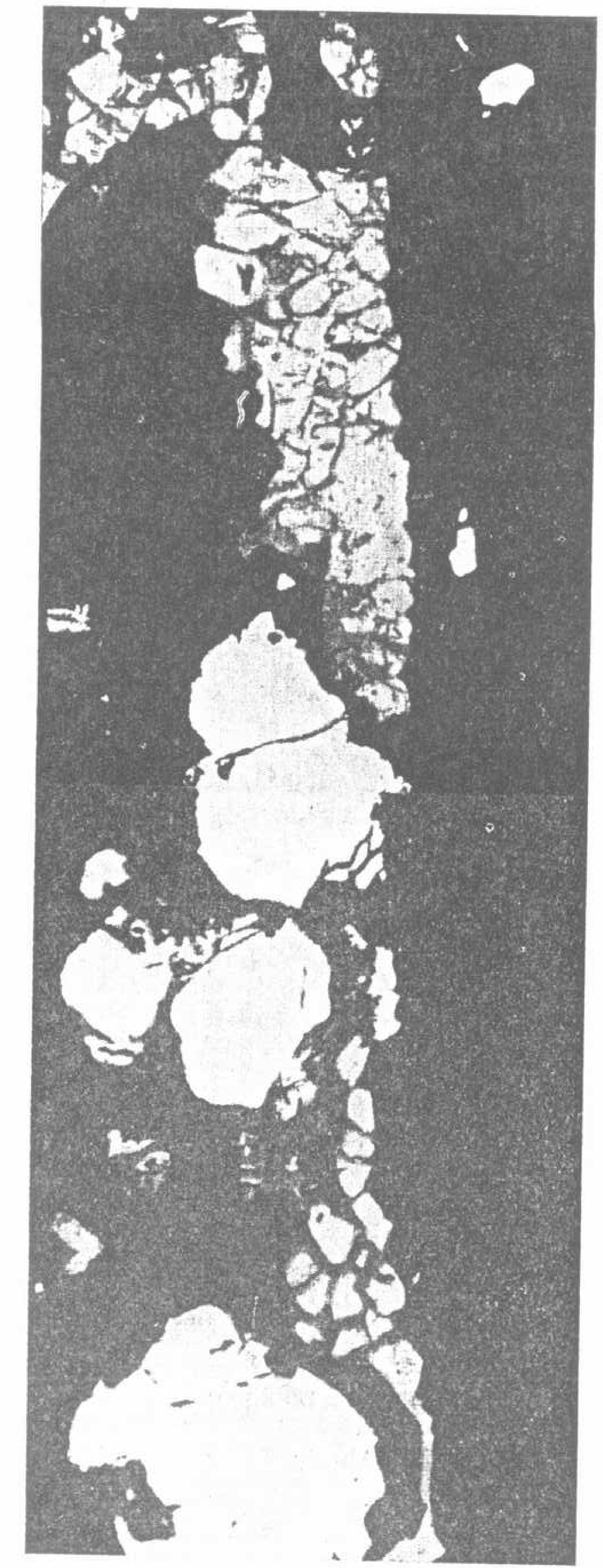


FIG. 29. Microfotografía de antigua arena de cuarzo-pirita-pechblenda, en que se aprecia el ritmo de sedimentación, en Blind River, Canadá (×22½). Negro: cuarzo; granos individuales, que no se definen en la reproducción. Blanco: pirita. Gris oscuro: pequeños granos de pechblenda (de RAMDOHR, 1958).



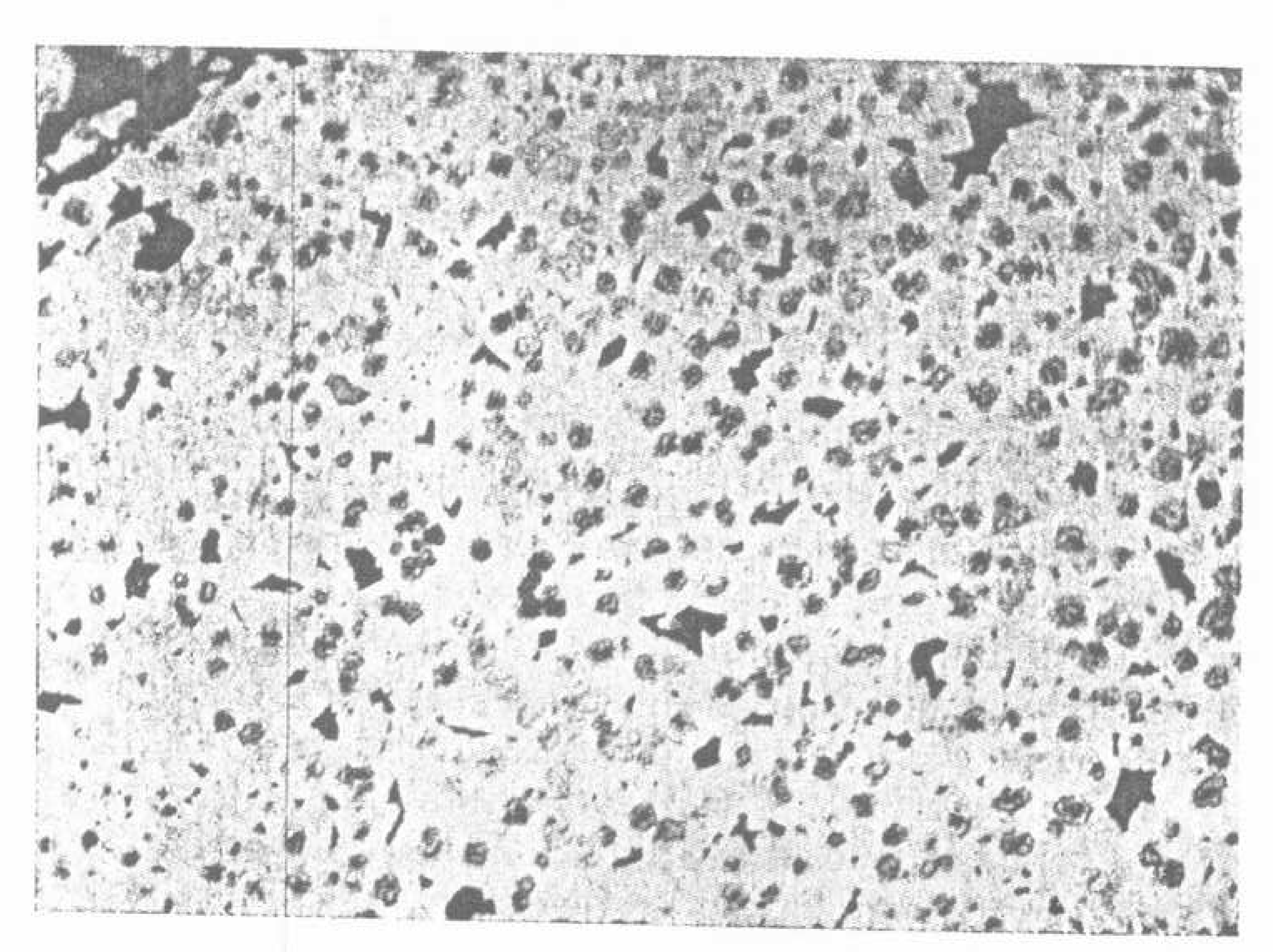


FIG. 30. Microfotografía de la superficie pulida de granos de pirita en la arena antigua de Witwatersrand, Sudáfrica (×250). Las manchas oscuras indican centros de deposición antiguos (de RAMDOHR, 1958). En la sección original, escribe el profesor RAMDOHR, esos puntos oscuros muestran una microestructura, que no se aprecia en la reproducción. Se ve que están formados por un punto oscuro central rodeados por las manchas más o menos rectangulares que pueden apreciarse claramente en este grabado. Se cree que el punto central, y los circuitos envolventes, representan las "bacteriopiritas" originales —más probablemente hongos— que sirvieron de núcleos para la ulterior formación inorgánica de los cristales de pirita (RAMDOHR). No se conoce con exactitud la edad de estos yacimientos biogénicos, pues se encontraron en superficies pulidas de guijarros dentro de los bancos de Witwatersrand. Si admitimos la edad de 1 800 millones de años, correspondería a su antigüedad mínima; pero su formación original pudo ocurrir mucho antes. El hallazgo de semejantes restos de mineral de una escala tan reducida, mediante el examen microscópico de gran aumento, es en gran parte cuestión de suerte; aún no se ha realizado una investigación sistemática en busca de semejantes estructuras en yacimientos primitivos.


FIG. 29. Microfotografía de antigua arena de cuarzo-pirita-pechblenda, en que se aprecia el ritmo de sedimentación, en Blind River, Canadá (×22¹/₂). Negro: cuarzo; granos individuales, que no se definen en la reproducción. Blanco: pirita. Gris oscuro: pequeños granos de pechblenda (de RAMDOHR, 1958).

durante la formación de estos yacimientos. La figura 30 nos muestra una sección pulimentada de un grano de pirita llevado a una ampliación mayor. Se cree que las muchas manchas que se aprecian representan puntos de sedimentación de sulfuro de hierro, debida a la acción de microbios primitivos.

La conclusión que se deduce del estudio de estos yacimientos es que se formaron bajo una atmósfera reductora, anoxigénica.

No todos los geólogos estarán de acuerdo con esta conclusión. Ello se debe a que esos arrecifes son antiquísimos y, consiguientemente, se han borrado u oscurecido muchas veces las estructuras primitivas de su sedimentación por efecto de procesos secundarios posteriores. La pirita y demás sulfuros, lo mismo que el oro, se movilizan fácilmente y vuelven a depositarse en una sedimentación secundaria en el transcurso de los largos periodos de la historia geológica posterior. Además, la desintegración radiactiva del uranio bombardea sin cesar los granos de pechblenda, fenómeno que también tiende a borrar las estructuras primitivas. Si, por ejemplo, examinamos los granos de pirita, vemos cuántos de estos redondeados granos fueron recubiertos posteriormente por nuevas concreciones de pirita, depositadas en este caso según planos cristalográficos, lo cual tiende a impedir que se pueda reconocer la redondez original de los granos de la arena de pirita (figuras 31 y 32). Algunos geólogos han sido desorientados por estos fenómenos secundarios, a los que se atribuyeron carácter primario.

Pero las muchas propiedades de estos bancos, que encajan bien en el cuadro que tendrían que ofrecer los antiguos yacimientos de tipo de placer de gravillas y arenas, junto con la semejanza impresionante que existe entre esos diversos yacimientos tan separados en el espacio y en el tiempo, demuestran que RAMDOHR tiene razón en su interpretación. Un estudio posterior de LIEBENBERG —1960— vino a confirmar además estos resultados.

Ahora bien, una vez aceptada esta explicación, la omnipresencia de granos de sulfuros y de pechblenda en las arenas y gravillas demuestra convincentemente que su deposición tuvo lugar en los cuatro parajes mencionados bajo una atmósfera de carácter reductor.

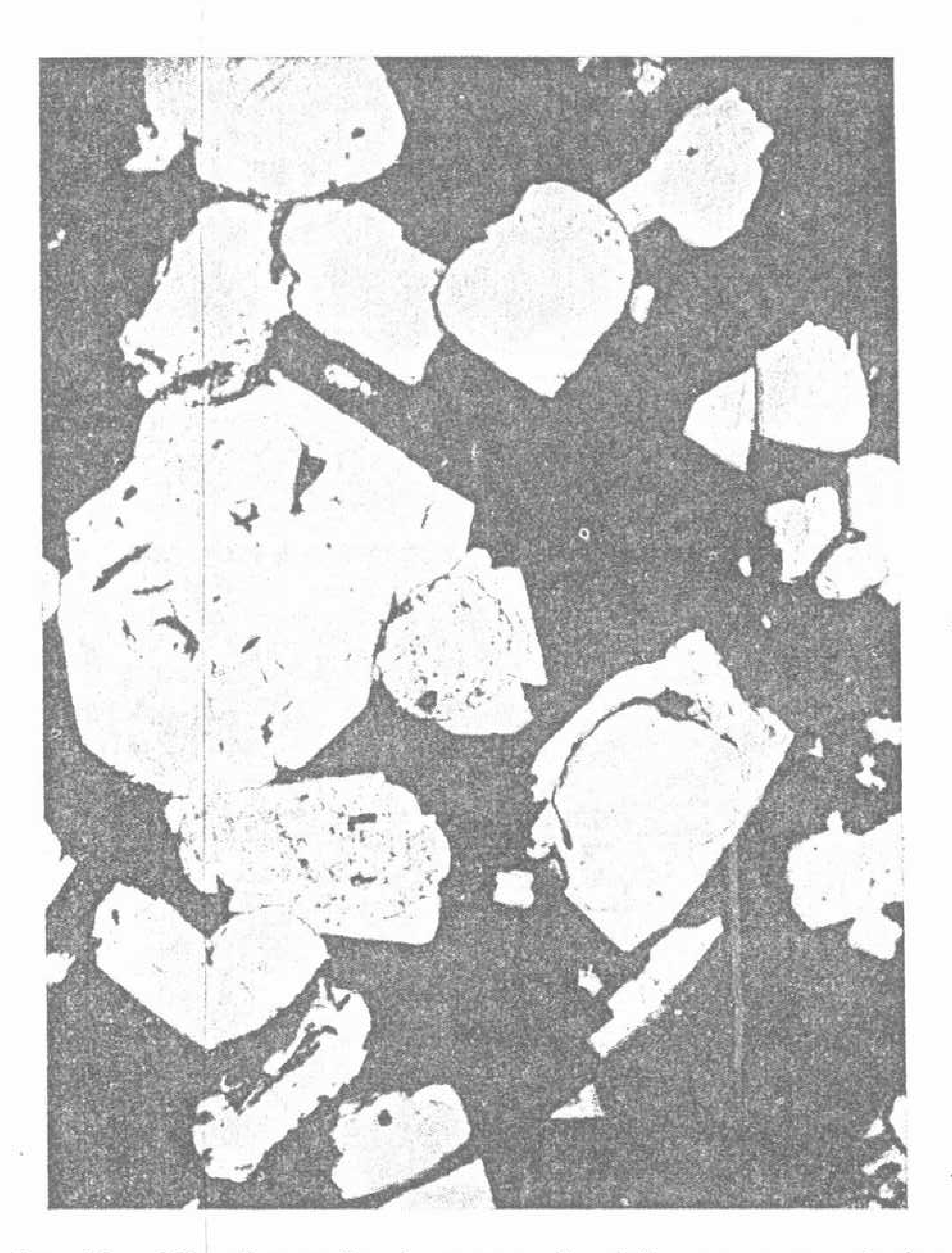


FIG. 31. Microfotografía de granos de pirita en cuarzo de las arenas antiguas de Witwatersrand, Sudáfrica (×70). Los granos redondeados muestran acreciones posteriores de pirita, constituidas después de la deposición de las arenas, siguiendo los planos del cristal, lo que tiende a borrar la redondez de los granos originales de arena de pirita (de RAMDOHR, 1958).

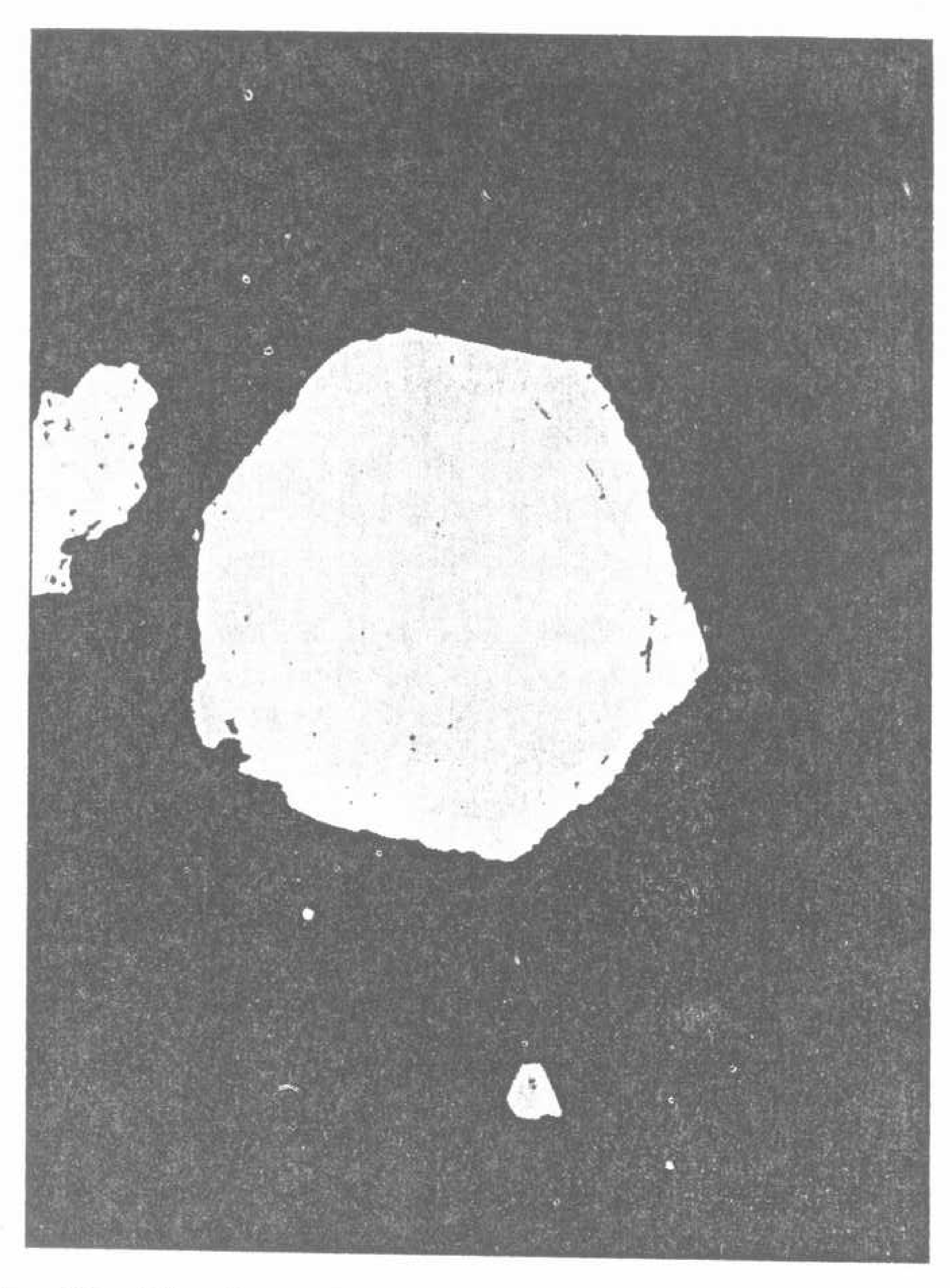


FIG. 32. Microfotografía de un grano de pirita redondeado, rodeado por un depósito más joven que creció en torno al grano original, mostrando la forma cristalina de la pirita (×250). Serra de Jacobina, Brasil (de RAMDOHR, 1958).

EDAD DE LOS SEDIMENTOS FORMADOS BAJO ATMOSFERA ANOXIGENICA

En la tabla VI damos, a título de tanteo, la edad de estos yacimientos.

Teniendo en cuenta la tendencia que ofrecen las conjeturas de edades, en cronometrías absolutas, a aumentar a medida que se las puede precisar mejor, podemos afirmar, sin miedo a equivocarnos, que las edades de estos yacimientos oscilan entre los 2 000 y los 3 000 millones de años de edad. Esto quiere decir que hace 2 000 millones de años aún existía sobre la Tierra una atmósfera reductora, anoxigénica.

TABLA VI

Edad conjetural de los yacimientos de oro-uranio formados bajo atmósfera anoxigénica, según el estudio de Ramdohr (1958)

Dominion Reef, Africa del Sur	3 000 millones de años
Serra de Jacobina, Bahía, Brasil	?
Witwatersrand, Sudáfrica	1 800 millones de años
Blind River, Ontario, Canadá	1 100 * millones de años

ESTUDIOS DE LEPP Y GOLDICH: FORMACIONES FERRIFERAS

Por el estudio de las formaciones ferríferas, LEPP y GOLDICH —1959— llegaron a conclusiones muy parecidas a las de RAMDOHR. Las formaciones ferríferas se forman por sedimentación superficial de mineral de hierro, tales como los de carácter económicamente importante encontrados en las antiguas cuencas de Norteamérica, por ejemplo, alrededor del Lago Superior, y las minetas del Jurásico en Lorena y Luxemburgo. También puede encontrarse el mineral de hierro en filones; en realidad, la mayoría de las minas de hierro económicamente importantes de la historia primitiva y de los tiempos medievales estaban formadas por filones.

* Una cifra superior a los 1 700 millones de años—DERRY, 1959— probablemente se acercaría más a la edad real.

Un ejemplo que conserva todavía cierto valor económico es el de Siegerland, en Alemania Occidental. En los filones de mineral, el hierro procede por deposición de soluciones originadas en los niveles más profundos de la corteza. La formación de estos filones es un proceso endogénico, en oposición a las formaciones ferríferas constituidas por procesos exogénicos.

A este último fenómeno se le denomina lateritización; pero este término abarca una amplia gama de reacciones químicas diferentes. La lateritización lleva a un enriquecimiento relativo en hierro de la roca afín, principalmente mediante la solución de sus otros componentes. Así, pues, las formaciones de hierro son minerales residuales o, por expresarlo en una fórmula supersimplificada, son el remanente de las rocas afines, progenitoras, por la acción de los procesos de lateritización.

Según LEPP y GOLDICH, existe una distinción marcada y coherente entre las formaciones ferríferas del Precámbrico y las más jóvenes. Las del Precámbrico son silíceas, mientras que en los depósitos más jóvenes el hierro y la sílice se separaron mediante los procesos de lateritización desarrollados a lo largo de la historia posterior de la Tierra. Si encontramos formaciones de hierro silícicas más recientes, tales como las que aparecen intercaladas entre las minetas, se debe, evidentemente, a que se formaron en virtud de un proceso secundario de silicificación, posterior a la lateritización original. Ahora bien, LEPP y GOLDICH suponen que la diferencia existente entre las formaciones de hierro precámbricas y todos los yacimientos posteriores se debe a la deficiencia relativa de oxígeno de que adolecía la atmósfera precámbrica. Esta es una manera sumamente cautelosa de decir que la atmósfera precámbrica era anoxigénica.

Así es que la conclusión a que llegan LEPP y GOLDICH coincide bien con los resultados de los estudios de RAMDOHR y RANKAMA. Es de esperar que los estudios intensivos del profesor GOLDICH y col., acerca del Precámbrico de Minnesota y regiones adyacentes, suministre en un próximo futuro datos mucho más concretos. Un punto importante a dilucidar será el de la edad absoluta de estas formaciones ferríferas precámbricas, ya que suministrará determinado número de puntos de referencia cronométrica para periodos en que se

puede suponer que la Tierra conservaba aún su atmósfera anoxigénica. Las últimas obras de GOLDICH y col. —1961— dan ya las edades de los grupos principales estratigráficos, pero no contienen información detallada sobre la génesis de las diversas formaciones de hierro, encontradas en el escudo canadiense.

Los resultados presentados por LEPP y GOLDICH todavía ofrecen un interés más directo para nuestro tema, y es su observación de que las pizarras grafíticas aparecen generalmente asociadas con las formaciones de hierro precámbricas. Se cree que el contenido de carbono de estas pizarras grafíticas es de origen biogénico, lo cual indicaría una exuberancia de formas de vida primitiva en ese remoto periodo. Hecho que apunta en la misma dirección que los vestigios de las bacterias sulfurófilas encontradas por RAMDOHR en sus granos de pirita —Fig. 30—. Aunque son todavía extremadamente escasos los hallazgos de fósiles auténticos de esos tiempos primitivos, no cabe la menor duda de que ya entonces existía vida en la Tierra, precisamente cuando el medio ambiente geológico demuestra la existencia de una atmósfera anoxigénica primitiva.

SEDIMENTOS CONSTITUIDOS BAJO ATMOSFERA OXIGENICA: LAS CAPAS ROJAS

De los estudios hasta aquí reseñados se deduce que, en parajes adecuadamente conservados, los sedimentos antiguos pueden suministrar indicación de que se formaron bajo condiciones atmosféricas reductoras. También es válida la conclusión opuesta, es decir, que por el estado de oxidación de los sedimentos, éstos pueden indicar que se formaron bajo una atmósfera oxigénica.

Pero esta distinción hay que manejarla con precaución. No todo sedimento que contenga unos cuantos granos de sulfuros prueba la existencia de una atmósfera anoxigénica contemporánea; ni, al revés, tampoco cualquier sedimento formado por granos de óxidos demuestra automáticamente que se originó bajo una atmósfera oxigénica. El mineral más corriente de las arenas actuales, el cuarzo, por ejemplo, no nos dice nada acerca de la constitución oxigénica o anoxigénica de la atmósfera en que se formó, ya que se mantiene estable bajo cualquiera de

ellas. Cabe también que, bajo una atmósfera reductora, las arenas se depositasen ya tan bien clasificadas, es decir, tan bien separadas por tamaños y densidades durante su arrastre en los ríos y océanos, que todos los granos más pesados, como los sulfuros, se fueran depositando separadamente en cualquier otro punto del lecho del río o del fondo del océano, dando por resultado la formación de arenas de cuarzo puro.

Los elementos tipo ideales para reconocer la existencia de una atmósfera oxigénica mediante las características de los sedimentos de constitución contemporánea son los "lechos rojos".

Estos son sedimentos de cuarzo de grano fino, en su mayoría limosos, es decir, compuestos de material fino, con tamaño de grano comprendido entre los de las arenas y las arcillas. Generalmente comportan intercalaciones de arcilla de grano más fino, y también capas más bastas de arenas y conglomerados. El color varía entre rojo brillante y marrón rojizo y se debe a un pequeño contenido de hierro, generalmente con bajo porcentaje en peso. El hierro está al estado férrico, altamente oxidado, y se presenta principalmente en forma de limonita, $Fe_2O_3 \cdot n\,H_2O$. Es el mineral de hierro que se forma corrientemente bajo la acción oxidante de la atmósfera en superficie. Los lechos rojos se formaron principalmente en los desiertos antiguos, y son comparables a los bancos parecidos que se forman en los desiertos actualmente existentes.

Conocemos lechos rojos típicos de la historia geológica más moderna, la "normal", tales como el "Old Red" de edad devónica y el "New Red" del Triásico de Inglaterra, que cuentan con 400 y 200 millones de años, respectivamente. Se hallan lechos rojos parecidos en el Silúrico de Norteamérica, con edad de unos 450 millones de años. Durante el Permiano, de hace unos 250 millones de años, adquirieron los lechos rojos un desarrollo extensísimo en muchos lugares del Planeta.

Los conocimientos adquiridos mediante el estudio de las formaciones desérticas actuales y de las capas rojas de las últimas etapas de la historia geológica pueden aplicarse a los tiempos más arcaicos. A primera vista no deja de sorprendernos no encontrar en esas épocas verdaderos lechos rojos; pero así era de esperar lógicamente, dadas nuestras ideas sobre la atmósfera anoxigénica primitiva.

Existen depósitos de edad precámbrica con lechos rojos. Pero, lo mismo que ocurre con la mayoría de los fósiles precámbricos, esos hechos también pertenecen a finales de ese periodo. Las areniscas torridonianas de Escocia y las jotnianas de Fennoscandia constituyen un ejemplo pertinente. Ambas pertenecen al Precámbrico, pero precisamente al ciclo orogénico de finales del Precámbrico, al que corresponde también el Paleozoico más bajo. Los sedimentos precámbricos pertenecen a la misma serie; y aunque parezcan totalmente diferentes de los del Cámbrico por su carencia de fósiles, de hecho no son mucho más antiguos.

No han sido datadas adecuadamente las areniscas torridonianias ni las jotnianas, en cuya serie, las de Dala forman perfectos lechos rojos. Pero si aceptamos la edad de 600 millones de años para la base del Cámbrico, podemos calcular con seguridad que la edad de los lechos rojos precámbricos es menor que los mil millones de años.

Queda muy dentro de lo posible que aparezcan capas rojas más antiguas, y hasta debe ser objeto de ulterior investigación la fijación más exacta de las edades de los lechos rojos más antiguos, para intentar perfeccionar los aspectos geológicos del origen de la vida. Pero entre las que se conocen hasta ahora, no parecen muy de fiar aquellas que excedan de los mil millones de años. Voy a dar dos ejemplos, tomados ambos del viejo escudo canadiense. Alrededor del lago Athabasca, en Canadá occidental, se describieron lechos rojos como mucho más viejos. Pero hubo confusión entre las rocas, mucho más antiguas y bien datadas, de la base y los lechos rojos, mucho más jóvenes, que pertenecen incluso al Paleozoico —GUSSOW, 1959—. Tenemos otro ejemplo en el geosinclinal del Labrador, en Canadá central, donde GASTIL y otros comunicaron hace muy poco la existencia de lechos rojos más antiguos que la llamada "orogenia" de Grenville, cuya edad suele fijarse alrededor de los mil millones de años —GASTIL y col., 1960, pág. 25—. Pero precisamente esos lechos rojos caen fuera del área de la orogenia de Grenville, lo cual hace sumamente difícil la correlación.

Así, pues, aplicando los mismos criterios empleados para las edades conjeturales aventuradas para los sedimentos constituidos bajo atmósfera anoxigénica, sólo podemos proponer

igualmente edades conjeturales para los lechos rojos más antiguos. De manera muy general, podemos situarlos hace unos mil millones de años.

CRONOMETRIA PROVISIONAL DEL PERIODO DE TRANSICION ENTRE LAS DOS ATMOSFERAS

Esa edad conjetural de mil millones de años para los lechos rojos más antiguos nos proporciona una edad mínima provisional para la atmósfera oxigénica actual. Por otra parte, pudimos establecer la edad conjetural de 2 000 millones de años para los sedimentos más recientes de entre los que sabemos se formaron bajo atmósfera anoxigénica. Esta es la edad más baja que podemos asignar, por ahora, a la remanencia de dicha atmósfera en nuestro Planeta.

Así, podemos cerrar este capítulo afirmando, de momento y a título provisional, que el estudio de los sedimentos formados durante la historia primitiva de la Tierra suministra a la Geología las siguientes conclusiones:

Anteriormente a los últimos 2 000 millones de años, y por lo menos hasta esa fecha, la atmósfera de la Tierra era anoxigénica y no contenía oxígeno libre. Lo mismo la vida en la Tierra que los procesos exogénicos geológicos eran de carácter preactualista, por lo menos hasta esa época.

Hace por lo menos un millar de millones de años que la atmósfera es ya oxigénica, y desde entonces, lo mismo la vida sobre nuestro Globo que los procesos geológicos exogénicos, tienen carácter actualista. Así ocurre, por lo menos, a partir de esa época en adelante.

La transición entre la atmósfera primitiva anoxigénica y la actualista oxigénica tuvo lugar entre los 1 000 y 2 000 millones de años. No sabemos cuándo se produjo de hecho, pero podemos esperar confiadamente que mediante estudios ulteriores se podrá definir mejor esa época. Tampoco sabemos el tiempo absoluto que fue necesario para completarse esa transición o si se expresa en años o en millones de años. Pero suponemos que se desarrolló gradualmente, en un cambio lento, que debió prolongarse por un periodo considerablemente largo, incluso comparado con los enormes lapsos que exigen otros procesos importantes de la Geología.

TIPOS DE PRUEBAS GEOLOGICAS QUE SE DEDUCEN DE LOS FOSILES Y DEL AMBIENTE

Si comparamos ahora unas con otras nuestras conclusiones de los dos últimos capítulos, observamos una gran variedad entre las clases de pruebas que puede suministrar la Geología. Hemos distinguido tres grupos: fósiles auténticos, yacimientos biogénicos y pruebas deducidas del ambiente, tal como lo definen los procesos exogénicos contemporáneos.

Los fósiles no sólo nos dicen que había vida sobre la Tierra en aquellas épocas, sino que nos indican qué clase de vida era.

Los yacimientos biogénicos, lo mismo las costras calizas descritas por MacGregor, las pizarras grafíticas de Lepp y Goldich, las manchas biogénicas microscópicas de los granos de pirita puestas de manifiesto por Ramdohr, que los grandes arrecifes de algas secretoras de cal del tipo de las *Collenia*, sólo nos suministran información de carácter muy general acerca de la existencia de vida en la Tierra durante esos periodos.

Pero ni los fósiles ni los yacimientos biogénicos nos dicen nada acerca del metabolismo de la vida de su tiempo, es decir, sobre su carácter oxigénico o anoxigénico. Este último punto sólo puede dilucidarse analizando el medio ambiente en que se desarrolló la vida primitiva. Sólo a la vista de ciertos tipos especiales de formaciones sedimentarias antiguas, constituidas por los procesos exogénicos de aquellas épocas, podemos obtener conclusiones acerca del carácter de la atmósfera de entonces, es decir, sobre su constitución oxigénica o anoxigénica.

CAPITULO 9

Consideraciones geológicas varias

CONSIDERACIONES GENERALES

Aparte de los fósiles y demás vestigios de vida primitiva sobre la Tierra y aparte del carácter del medio ambiente que puede deducirse por el estudio de los procesos geológicos exógenos contemporáneos, hay otras consideraciones diversas que tienen también incidencia en el estudio del origen de la vida sobre nuestro Planeta. En los dos capítulos precedentes estudiamos los fósiles y los yacimientos biogénicos. Este lo reservamos para tocar esos otros temas adicionales de carácter misceláneo.

El primero se refiere a la importancia de las arcillas y cuarzos para el desarrollo selectivo de algunos compuestos "orgánicos" durante aquellos tiempos remotos de fotosíntesis inorgánica. Otro tema consiste en averiguar si la atmósfera primitiva pudo contener alguna vez suficiente dióxido de carbono como para poder producir la cantidad actual de oxígeno libre mediante la fotosíntesis orgánica; e, inversamente, dónde está todo el carbono producido por fotosíntesis orgánica durante los últimos mil millones de años —por lo menos—. Es preciso que investiguemos si la Geoquímica puede responder a estas interrogantes mediante formulación de cálculos globales cuantitativos de determinados elementos. Luego se analizará la estabilidad aparente de la temperatura de la Tierra a lo largo de los dos últimos millares de millones de años. Durante todo ese tiempo nunca estuvo sometida simultáneamente, toda ella, a excesos de calor o de frío, con la consecuencia de que quedase extinta la vida formada anteriormente a base de proteínas. Al fin del capítulo añado algunas observaciones, no ya sobre la geología misma, sino sobre el peligro de determinado tipo de razonamiento científico que flota actualmente en el ambiente, y que consiste en una forma de bioquímica comparativa esforzada por determinar qué es lo "más antiguo"

o más primitivo. Los geólogos recuerdan perfectamente aquel tipo de anatomía comparativa que estuvo de moda en la primera mitad del presente siglo, que seguía una línea de razonamiento en todo parecida a la que tiende a seguir hoy día la Bioquímica comparada. La Paleontología ha demostrado cuán fácil es obtener conclusiones equivocadas, aun de las deducciones más obvias de la anatomía comparativa, por la sencilla razón de que el desarrollo histórico siguió un curso diferente. Esto supone un aviso para que nos abstengamos de seguir semejante línea de pensamiento en Bioquímica comparativa.

IMPORTANCIA DE LAS ARCILLAS

La arcilla es uno de los tipos de roca que más abundan hoy día en la superficie de la Tierra y, por lo que sabemos, de los más antiguos sedimentos depositados en los primeros tiempos del Precámbrico; debió presentarse entonces más o menos con la misma abundancia que ahora. Las arcillas son rocas de grano muy fino. Están constituidas por un grupo de minerales emparentados —los minerales arcillosos—, todos los cuales presentan una estructura análoga: están compuestos de silicatos de alúmina, con abundancia de agua y varios otros cationes, y de estructura decididamente escamosa. Se parecen a la muscovita, tanto por su composición química como por la estructura de red cristalina, aunque cada cristal en sí sea de dimensiones mucho más pequeñas. Su red espacial presenta capas paralelas, finas, bien definidas, de iones fuertemente trabados, separadas por vacíos en los que únicamente se encuentran unos pocos grupos de hidroxilos o cationes —Fig. 33—. La distancia que separa las distintas capas paralelas que constituyen su red pueden variar mucho, según el número de iones que contengan los vacíos.

Las arcillas pudieron tener importancia de dos maneras. El tamaño extraordinariamente minúsculo de cada grano da por resultado una superficie granular sumamente extensa por peso de muestra arcillosa. Esto permite que esas superficies realicen una intensa adsorción de los diversos componentes del "caldo claro". Además, la red cristalina de las arcillas constituye, en disposición transversal a la de sus capas paralelas, pilas pequeñísimas para cualquier proceso de difusión. Lo

mismo que las pilas en Tecnología, éstas pueden haber acentuado los procesos de diferenciación. La difusión diferencial, que es de valor mínimo a través de una sola capa, pudo resultar de importancia al sumarse todas las del cristal entero, a pesar de su insignificancia.

Así es que la adsorción diferencial en la superficie de los granos de arcilla y la difusión diferencial a través de las redes

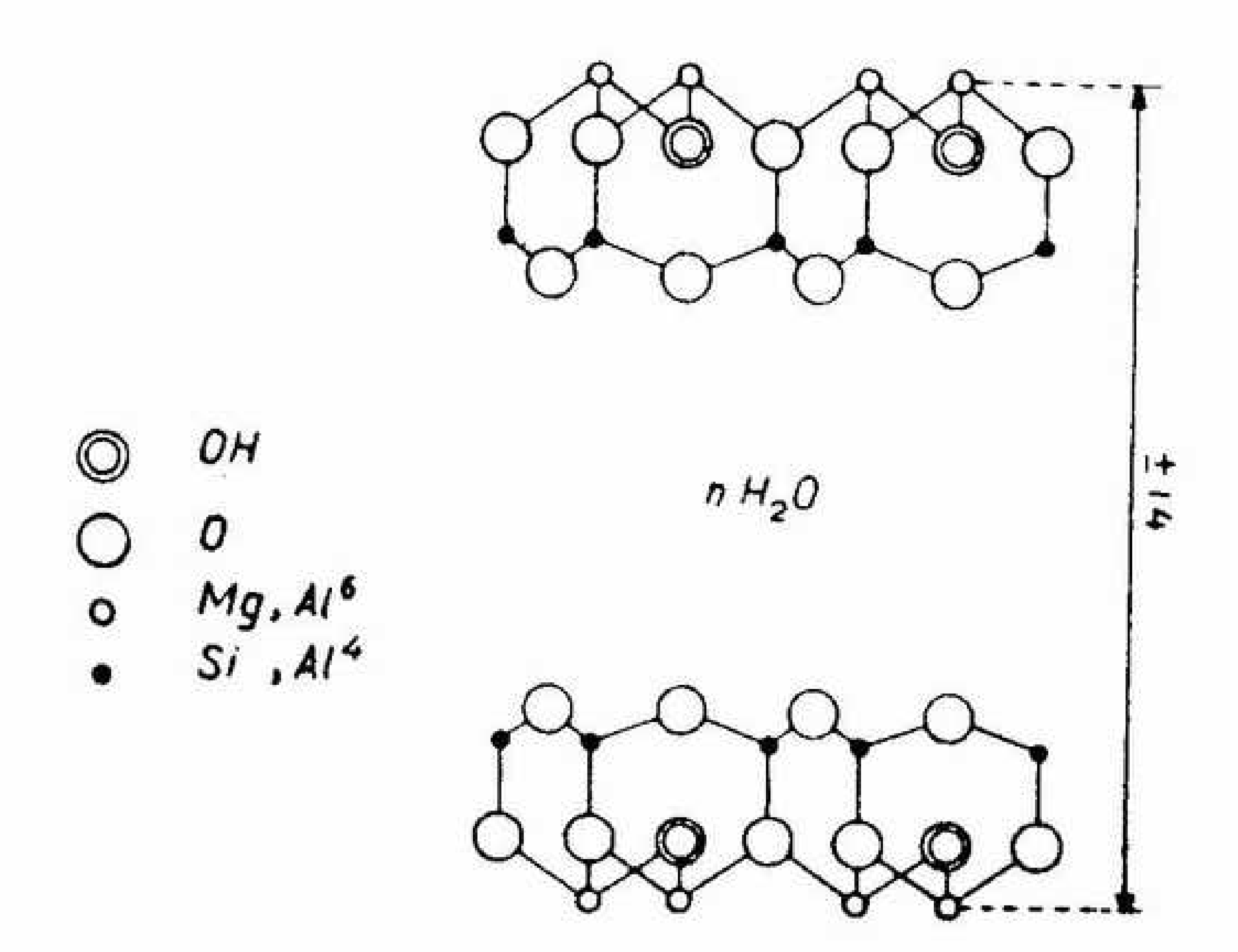


FIG. 33. Corte esquemático de la red cristalina de la montmorillonita, uno de los minerales de las arcillas. Cada capa de silicato está separada por un número de moléculas de agua, de floja cohesión, por lo cual la arcilla hincha cuando se moja, y encoge cuando se seca. La distancia máxima entre las capas de silicato es de 14 Å (de BIJVOET y col., 1948).

cristalinas, armadas por sus diminutas pilas, pudieron ser muy significativas en los primeros tiempos de la fotosíntesis inorgánica. Naturalmente, nada sabemos de esos procesos; pero como es bastante probable que hayan ocurrido, no está de más recordar que las arcillas abundaron en aquellos tiempos.

LA IMPORTANCIA DEL CUARZO

Parecido caso ofrece el cuarzo, especie mineral tan corriente que forma los granos de casi todas las arenas de hoy día. Aunque bajo la atmósfera primitiva existían otras arenas, como

vimos en el capítulo precedente, eran también muy corrientes las de cuarzo, incluso en los tiempos más remotos de la historia geológica del Globo. La importancia que tiene el predominio del cuarzo en la superficie terrestre reside en el hecho de que toda la materia viva de la actualidad es "ópticamente" activa. Este hecho, que descubrió por primera vez LOUIS PASTEUR, ha sido confirmado posteriormente por todos los estudios realizados desde entonces.

TERENT'EV y KLABUNOVSKII —1960— y KLABUNOVSKII —1960— publicaron unos trabajos sobre este tema en el Symposium de Moscú; a ellos remitimos al lector que desee plena información. Baste afirmar aquí que el cuarzo, con su red cristalina ligeramente asimétrica, posee una superficie dotada de actividad óptica. Mediante la adsorción selectiva de compuestos que poseen partículas ópticamente activas, pero que permanecen inactivas por presentarse en proporción del 50 por 50, pueden formarse compuestos ópticamente activos. Sin embargo, en la Naturaleza existen probablemente tantos granos de cuarzo de superficies *dextras* como *laevas*. Consiguientemente, la actividad óptica de la superficie del cuarzo no basta en sí misma para producir la separación óptica. Sin embargo, existe la probabilidad de que haya un proceso selectivo natural actuante sobre esa interacción de los primeros componentes "orgánicos" con respecto a las superficies ópticamente activas de los granos de cuarzo. Esto es lo que ocurre cuando la luz solar, después de atravesar la atmósfera, muestra una polarización circular a derechas. En teoría parece posible que la luz solar operase una destrucción de las *dextro*-formas de los compuestos "orgánicos" primitivos en el "caldo claro". Esto hubiera producido la preponderancia de las formas *laevo*-activas, que condujeron a la vida primitiva.

Tampoco aquí conocemos los procesos que tuvieron lugar de hecho. La actividad óptica y otros elementos de asimetría que presenta la vida moderna resultan difíciles de imaginar sin las complicadas reacciones en cadena del tipo indicado anteriormente. La disponibilidad de las superficies ópticamente activas de los granos de cuarzo, que se encontraban por todas partes, muy bien pudo desempeñar un papel de gran importancia en esas reacciones.

INVENTARIOS GEOQUIMICOS

Como indiqué en las frases preliminares de este capítulo, hay aún otra rama totalmente distinta de las Ciencias Naturales a la que podemos recurrir para encontrar argumentos a favor o en contra de las nuevas teorías que refieren el origen de la vida a la interacción de las causas naturales. Es la Geoquímica, la cual establece cálculos globales acerca de la abundancia de ciertos elementos de la corteza terrestre.

Es de estos inventarios globales de los que podemos deducir conclusiones formales. El mejor ejemplo para nuestro caso estriba en la presencia de oxígeno libre en la atmósfera. Las teorías astronómicas anteriores explicaban este hecho admitiendo la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno libre. Los océanos ofrecen agua de sobra, incluso en tal abundancia que casi pasaría inadvertida la pérdida que supondría la descomposición necesaria para crear todo el oxígeno libre atmosférico actual. Según este concepto, el hidrógeno resultante de la descomposición se habría escapado desde la atmósfera hacia el espacio, quedando sólo el oxígeno, por ser más pesado. En contraposición a esta teoría, postulamos actualmente el origen biogénico de esa misma cantidad de oxígeno, pero formado por disociación del dióxido de carbono. Pero ¿es esto admisible? ¿Es que existió alguna vez en la atmósfera y en la hidrosfera suficiente cantidad de dióxido de carbono como para suministrar todo ese oxígeno libre? ¿Qué es lo que ocurrió con el carbono fijado por las plantas y producido al mismo tiempo que se liberaba el oxígeno? ¿Hay comparación posible en sitio alguno entre la cantidad de carbono fósil, tanto en forma de carbón como de petróleo, y el oxígeno liberado? Teóricamente, la Geoquímica debería poder contestar a estas preguntas.

Ahora bien, la dificultad de los balances geoquímicos es siempre la misma, a saber: que se fundan en toda una serie de suposiciones con buenas dosis de hipótesis. Sólo conocemos la constitución del nivel superior de la corteza hasta una profundidad de algunos kilómetros mediante las labores de las minas y de los sondeos petrolíferos. Los núcleos antiguos de las cordilleras erosionadas pueden darnos una visión de la constitución local de partes de la corteza que estuvieron previamente soterradas, posiblemente hasta una profundidad de 30 km. Pero los inventarios globales tienen que recurrir a extrapolaciones excesivamente aventuradas a partir de esos datos tan escasos. Hoy día, por ejemplo, existe una gran diferencia entre la estructura y composición de la corteza existente bajo los continentes y océanos. Por tanto, los balances geoquímicos habrán de variar según que el autor se atenga a alguna de las series de teorías que postulan la permanencia de los océanos y continentes, o bien acepte la posibilidad de que grandes masas continentales se hundiesen en las profundidades oceánicas.

Consiguientemente, la Geoquímica no está en condiciones de dar respuestas sólidamente fundadas a muchos de los interrogantes a que en teoría debiera poder contestar. Aquí voy a seguir las ideas de un reciente resumen hecho por ENGELHARDT —1959—, basado en el supuesto de cierta permanencia de los océanos y continentes.

A juicio de ENGELHARDT, la Geoquímica no es capaz de contestar a la cuestión sobre la cantidad de dióxido de carbono contenido en la atmósfera y en la hidrosfera. Y la razón es que el dióxido de carbono no constituye un sistema cerrado sobre la superficie terráquea, ya que la actividad volcánica inyecta constantemente dióxido de carbono en la atmósfera. Es éste uno de los gases más comunes ligados a ese fenómeno geológico, no sólo durante la erupción propiamente dicha, sino también durante el periodo de descenso de la actividad volcánica y de su extinción en las fumarolas y manantiales termales. Pero hasta el presente no ha podido ni siquiera ser estimado el ritmo de producción alcanzado por la actividad volcánica con la mínima base de garantía. Mucho menos conocemos su producción en los tiempos geológicos pasados. Lo único que sabemos es que durante la historia geológica, la actividad volcánica presentó variaciones muy grandes. Por consiguiente, aunque podamos suponer que la producción de dióxido de carbono procedente de este origen fuera suficiente para explicar el oxígeno libre actual, carecemos de datos fehacientes que puedan servirnos de base para un balance.

Más afortunados hemos sido con la otra cara del proceso: la producción del carbono que realizan las plantas durante la fotosíntesis orgánica. Después de estudiar cuidadosamente la

cantidad de carbono fósil contenido en los sedimentos de la corteza terrestre, ENGELHARDT llega a la conclusión de que su orden de magnitud es compatible con la suposición de que todo el oxígeno libre que existe hoy día es de origen biogénico.

Se impone la conclusión de que las respuestas dadas por la Geoquímica son sumamente decepcionantes y de que no pueden ofrecernos gran seguridad. Pero son lo mejor que podemos ofrecer en el momento actual y han sido consideradas muy concienzudamente. Consuela pensar que, por lo menos, no se oponen a la teoría moderna sobre el origen biogénico del oxígeno libre, que es uno de los quicios sobre el que giran los conceptos recientes acerca del origen de la vida en nuestro Planeta. Como ocurría en otros puntos mencionados anteriormente en este libro, en este caso tampoco tenemos pruebas, pero podemos darnos por satisfechos al encontrar que las que se conocen tampoco se oponen rotundamente.

UNIFORMIDAD DE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Abordaremos ahora otro nuevo aspecto relacionado con la historia de la vida sobre la Tierra: me refiero a la notable uniformidad de temperatura a que se mantuvo su superficie, por lo menos a lo largo de los 2 000 ó 3 000 millones de años en los que hubo vida perfectamente desarrollada. Aunque no sea cuestión que afecte directamente al origen de la vida, es una circunstancia que hizo posible su conservación y su evolución.

En todo caso, es una cuestión de vital importancia para nosotros. En efecto, si en un momento dado en el transcurso de esos 2 000 ó 3 000 millones de años se hubiera producido una catástrofe que hubiese acabado con la vida en la Tierra, hubiera tenido que repetirse de nuevo todo el proceso antes de que se presentase nueva posibilidad de vida en nuestro Planeta. Es decir, que habrían tenido que desarrollarse otra vez todos los procesos primitivos de fotosíntesis inorgánica, más los que llevaron al consiguiente predominio selectivo, y lo mismo tenemos que decir de todos los demás. Pero los diversos procesos selectivos son función de tantas variables independientes, tales como mutaciones y factores ambientales, que el resultado eventual de semejante repetición habría sido totalmente diferente del alcanzado por el esquema anterior. Y aunque, por casualidad, hubiesen reaparecido los mismos tipos bioquímicos, la expresión morfológica de ese segundo ciclo de desarrollo de la vida hubiera sido ciertamente muy distinta de la actual.

Por eso tiene gran importancia este asunto de la constancia de la temperatura sobre la superficie terrestre. De no haber sido así, no estaríamos aquí analizando nuestros orígenes remotos. Aparte de esto, tiene también interés en relación con la posibilidad de existencia de vida en otros planetas de nuestro sistema solar o en otros sistemas solares. De existir vida en otros astros, deben haber concurrido también circunstancias que permitiesen, por una parte, algún tipo de parecidas reacciones inorgánicas que condujesen a alguna clase de protovida; pero además debieron haberse mantenido con invariabilidad suficiente que hiciera posible la subsiguiente conservación y, por supuesto, la evolución de esa determinada forma de vida en el cuerpo celeste.

Volviendo a nuestro tema, aquí en la Tierra nuestro tipo de vida se ha basado en las proteínas a lo largo, cuando menos, de 2 000 millones de años. Ahora bien, la protenía es una sustancia sutil: no puede sobrevivir las temperaturas extremas de congelación ni las de ebullición durante ningún lapso geológico. De aquí se deduce que la temperatura media anual de la superficie terrestre no puede haber variado más de una veintena de grados centígrados. O sea, dicho en otras palabras, que durante este periodo se ha mantenido con notable estabilidad.

En beneficio del lector corriente, habré de matizar esta afirmación, ya que, familiarizado más bien con la bibliografía geológica normal, puede que tenga la impresión de que en el pasado geológico se produjeron cambios sumamente bruscos de temperatura, por ejemplo, tales como los que provocaron las épocas glaciales.

Por supuesto, no cabe duda de que existieron esos periodos glaciales. Hasta podemos suponer que hoy día estamos viviendo no un periodo postglacial, sino interglacial, entre el último y el próximo glacial, que pudiera sobrevenir perfecta-

mente por razones geológicas, aunque, dicho sea de paso, es muy posible que pueda el hombre impedirlo, consciente o involuntariamente, por exceso de industrialización.

De modo que hubo épocas glaciales, y algunas de ellas ocurrieron en un pasado geológico reciente, hace un millón de años más o menos. Otras tuvieron lugar mucho tiempo atrás, hace de 200 a 350 millones de años, en los finales del Carbonífero y principios del Pérmico. También sabemos que ocurrieron otras edades glaciales en los últimos tiempos precámbricos, hará probablemente unos 600 millones de años. Además, es casi cierto que las hubo incluso en tiempos aún más antiguos, de los que sabemos aún menos. En contraste con esas edades glaciales, las hubo también más templadas que la actual. Son más difíciles de detectar geológicamente, pero bien podríamos hablar de épocas calurosas. Sirva de ejemplo el periodo final del Pérmico, en que, a continuación inmediata de la primera edad glacial pérmica, hubo una Edad Calurosa, la cual produjo en muchas partes del Globo una evaporación tan intensa, que originó la formación de la mayor parte de los yacimientos primarios de sal gema que conocemos.

De forma que la historia geológica del pasado ha conocido repetidas épocas glaciales, pero también algunas de grandes calores, aunque éstas sean peor conocidas. Pero, ¿qué quiere decir esto? La existencia de edades glaciales y edades calurosas indican cambios climáticos muy notables, pero de alcance limitado a partes de la Tierra. Ninguno de los últimos periodos glaciales alteró en modo alguno el clima de los trópicos, ni afectó a sus selvas ni a su régimen de lluvias, ni a las zonas centrales de los mares de coral. Ni las edades glaciales ni las de calor afectaron a toda la Tierra. Nunca se heló ni se hizo intolerablemente cálida la totalidad de la superficie de la Tierra. Los glaciares dominaron en las latitudes altas, en lo que son ahora zonas polares y templadas. Las edades cálidas se dejaron sentir predominantemente en las latitudes más bajas, tales como las actuales zonas tropicales y subtropicales. Las edades glaciales y tórridas sólo implican el descenso o la subida de la temperatura media anual global en menos de 10° C.

Por consiguiente, y para terminar, pese a la aparición de edades glaciales y cálidas, la temperatura media reinante en la superficie de la Tierra sólo acusa muy ligeras variantes en el transcurso de esos 2 000 millones de años. Ahora bien, lo importante es que ese periodo representa un lapso inmenso, aun medido a escala geológica y astronómica.

EFECTO DE INVERNADERO EJERCIDO POR LA ATMOSFERA

La temperatura media reinante en la superficie de la Tierra es la suma de una serie de variables independientes, entre las que las más importantes son: la radiación solar, el calor emanado de su interior y el poder de retención de calor ejercido por la atmósfera. Cada una de estas variables tiene su propia complejidad.

La radiación solar es la principal fuente de calor para la superficie terrestre. Ahora bien, parece estar bastante bien demostrado que, salvo los ciclos de manchas solares y de otras variaciones parecidas de escasa importancia, la radiación solar se ha mantenido sumamente constante, y no sólo se ha mantenido muy constante durante el breve espacio de algunos cientos de años, en que los meteorólogos han medido de hecho la radiación solar, sino que parece totalmente seguro que debió mantenerse igualmente constante a lo largo de varios miles de millones de años. Hoy en día se conocen razonablemente bien las sencillas reacciones nucleares que engendran el calor solar y pueden ser calculadas y extrapoladas a tiempos pasados con relativa facilidad. Por consiguiente, si tenemos en cuenta solamente la radiación solar, no tiene nada de sorprendente, después de todo, la constante temperatura media de la superficie terrestre.

Por otra parte, el calor emanado del interior de la Tierra es un factor que conocemos muy imperfectamente. Por lo que podemos conjeturar, pudo presentar importantes fluctuaciones en el pasado. Lo único que cabe es tomar nota de que sus variaciones nunca fueron tan extremas que pusiesen en peligro el mantenimiento de la vida sobre la Tierra.

El caso es que los climatólogos se ven apurados para explicar incluso los cambios de menor categoría en la temperatura media, tales como los que provocaron las últimas épocas glaciales. Esto se debe al hecho de que la capacidad de retención calórica de nuestra atmósfera es un factor sumamente

complejo, que posee varios mecanismos de retrogresión que compensan el enfriamiento o recalentamiento producidos por las variaciones en los factores calóricos primarios.

Por ejemplo, al recalentarse la superficie de nuestro Planeta por una intensificación de la radiación solar o de las emanaciones calóricas procedentes del interior de la Tierra, se produciría automáticamente un aumento de evaporación, que a su vez provocaría la formación de más nubes, las cuales afectarían directamente el poder de reflexión de la atmósfera o "albedo" de la Tierra, lo cual daría por resultado que llegaría a la superficie terrestre una cantidad menor de radiación solar. También pueden influir en el proceso otras variaciones más complejas, tales como un cambio de altitud en la tropopausa, zona intermedia entre la troposfera y la estratosfera, todo ello tendente a amortiguar el efecto de cualquier variación primaria de la radiación solar o del flujo de calor procedente del interior de la Tierra.

Por eso los climatólogos están estudiando afanosamente el mecanismo que pudo conducir a esas variaciones de orden menor en la temperatura media causantes de las edades glaciales. En cambio, no parecen interesarles tanto los motivos por los que no tuvieron lugar, ni siquiera en los largos periodos de la historia geológica, cambios más fuertes, que posiblemente hubieran perjudicado a la vida en la Tierra.

Por ejemplo, SHAPLEY —1953— enumera seis condiciones de exigencia para la existencia de vida en los planetas; cuatro de ellas tienen aplicación directa a nuestro problema. Son las siguientes:

1) "La estrella rectora no debe tener un índice de variación superior al 4 ó 5 por 100; no debe ser estrella doble, y, por supuesto, no debe estar expuesta a explosiones catastróficas, como las de las novas." El Sol, nuestro rector, ha cumplido estas condiciones por lo menos durante estos últimos miles de millones de años.

2) "La excentricidad orbital del planeta debe ser reducida, para evitar las alteraciones extremas de insolación al pasar el planeta del perihelio al afelio, y viceversa (la mayoría de las órbitas de los cometas serían mortales para los organismos)."

3) "El planeta debe tener un periodo de rotación apropiado, de modo que no se produzca exceso de frío en la noche ni de calor en el día." Pero la Tierra ha seguido también sensiblemente estas dos últimas recetas durante estos últimos miles de millones de años.

4) "El agua, como disolvente práctico en todos los procesos vitales, debe estar disponible en forma líquida. El tipo de vida de que estamos hablando y en la que estamos pensando no vive ni en vapor sin condensar ni en hielo al estado sólido. El requisito básico, por consiguiente, para que el planeta tenga vida es que debe estar a determinada distancia de su Sol —en el cinturón de agua líquida—, ni tan cerca como Mercurio está del Sol ni tan lejos como lo está Júpiter."

Estas cuatro condiciones se han cumplido para la Tierra, al menos, durante la mayor parte de la historia geológica. Aparte de la situación astronómica del planeta Tierra, colocado en una órbita intermedia alrededor de su estrella controladora, el factor más decisivo es la constancia de las radiaciones solares. Cualesquiera otras variaciones calóricas, como son la del calor terrestre y la ocasionada por la hipotética pantalla temporal formada por nubes de polvo estelar, parecen haber sido contrarrestadas en gran parte por el poder amortiguador de nuestra atmósfera. Esa capacidad retentiva del calor que posee la atmósfera, con sus mecanismos de recuperación y compensación, parece ser capaz de templar eficazmente cualesquiera variaciones posibles primarias en el flujo calórico. De aquí se deduce que nuestra atmósfera es, sin duda, un excelente invernadero, detalle que ha desempeñado un papel importantísimo en la evolución de la vida sobre la Tierra. En vista de que tal cualidad se basa principalmente en su vapor acuoso, que debió existir también en la atmósfera primitiva, podemos suponer que este benéfico efecto de invernadero se produjo ya en los albores del origen de la vida sobre la Tierra.

PELIGROS DE LA BIOQUIMICA COMPARATIVA

Como observación final de este capítulo, me gustaría añadir una digresión, no tanto acerca de hechos, sino sobre el modo como se los ha empleado en algunos razonamientos cien-

tíficos. En otras palabras, quiero prevenir contra cierto tipo de deducciones obtenidas por Bioquímica comparativa, que se van encontrando cada vez con más frecuencia en ensayos biológicos acerca del origen de la vida en la Tierra.

Estos razonamientos parten del supuesto básico de que lo que es más sencillo bioquímicamente en metabolismo, es más primitivo y, por consiguiente, más viejo en la historia de la vida. Este supuesto carece totalmente de fundamento. Nunca ha sido demostrado experimentalmente, y de hecho será dificilísimo comprobarlo. Además, muy posiblemente es falso.

La Geología ha conocido razonamientos análogos en anatomía comparativa, donde se confundió también en gran escala lo "sencillo" con lo "primitivo" y con lo "temprano". Han sido muchas las ramificaciones de la evolución en las que se involucraron y mezclaron miembros de distintas líneas evolutivas paralelas o convergentes, operación acompañada muchas veces por una despreocupación absoluta por las posiciones estratigráficas, es decir, por las edades relativas de esas formas. Suponían que unos antepasados imaginarios habían engendrado vástagos que realmente no guardan con ellos ninguna relación, y que a veces son anteriores a ellos en decenas de millones de años, y eso no porque se posea prueba paleontológica ninguna acerca de su paternidad, sino por el mero hecho de que parecen "más sencillos". Hasta ha habido que aplicar con cierta severidad el axioma de que "nadie puede ser el antepasado de alguien más viejo que él" para hacer frente a esa tendencia de la anatomía comparativa.

Así, por ejemplo, en la historia de los vertebrados, los primeros seres que se conocen fueron los animales marinos, los peces; y luego más tarde, otras formas menos sencillas fueron conquistando las tierras firmes. Pero esto no quiere decir que hayamos de clasificar a la ballena, la foca y la vaca marina como más primitivos que otros mamíferos y relegarlos a la corriente evolutiva de los peces actuales. Claro que el ejemplo es un tanto burdo, pero en realidad no difiere mucho del tipo de razonamiento que he mencionado anteriormente. Una tendencia parecida se manifiesta hoy día en la investigación sobre el origen posible de la vida a través de causas naturales. Se toman y ordenan en orden ascendente de antigüedad varios microbios anaeróbicos de metabolismo sencillo.

Pero eso es como proclamar que la ballena, la foca y el manatí son los mamíferos más antiguos.

Ni siquiera hay pruebas de que nuestras bacterias anaeróbicas actuales sean, ni mucho menos, tan antiguas. Es muy posible que se desarrollaran muy posteriormente a partir de vida aeróbica de tipo actualista, de la misma manera que los mamíferos acuáticos, mencionados hace un momento, volvieron a los océanos mucho después de que sus antecesores hubieran dado el paso evolutivo que les llevó del mar a las tierras firmes. El que una forma sea sencilla no demuestra que sea ni "primitiva" ni "temprana". Clasificar las bacterias anaeróbicas actuales en semejante orden ascendente da la falsa impresión de que sabemos sobre el origen de la vida mucho más de lo que realmente conocemos.

CAPITULO 10

El origen de la vida y su evolución ulterior

EVOLUCION Y PALEONTOLOGIA

Como colofón a las discusiones suscitadas en este libro, me parece apropiado subrayar una vez más la distinción entre el origen de la vida y su desarrollo inicial, por una parte, y su ulterior desenvolvimiento, por otra. Hoy día los geólogos se sienten seguros al afirmar que la Paleontología ha demostrado la existencia de la evolución natural durante los últimos 500 millones de años. Este hecho científico no se funda precisamente en que conozcamos todo cuanto se pueda conocer acerca de la evolución. Incluso es cierto lo contrario; todavía hay en las secuencias geo-paleontológicas muchas y variadas lagunas, tanto por lo que respecta al empalme de las estructuras divergentes que se ofrecen en diferentes grupos de plantas y animales como por lo que se refiere a las discontinuidades ocasionadas por las capas estériles intercaladas entre estratos fosilíferos. Con todo, mantenemos esa creencia, basada en gran parte en la evolución que ha seguido nuestro conocimiento del material paleontológico desde que se enunciaron por vez primera las teorías de la evolución. Esta creencia se debe al hecho de que los múltiples hallazgos afortunados realizados, que han dado a conocer eslabones que faltaban hasta entonces, siempre han ido confirmando, siquiera sea en sus líneas generales, la teoría de la evolución.

Por supuesto que, descendiendo ya a los detalles, ha habido que cambiar los parentescos, y que además siempre hubo en realidad más especies diversas de plantas y animales en los tiempos pasados que las que conocemos por sus restos fósiles. Cada nuevo hallazgo incrementa nuestros conocimientos, de lo que se deduce que la evolución fue a menudo más complicada en realidad de lo que daban a entender ciertos cuadros genealógicos trazados por los paleontólogos con rasgos demasiado esquemáticos y a base de un material excesivamente

pobre. Pero, a pesar de esas rectificaciones de pormenor, las línas directrices de la evolución han permanecido confirmadas con cada nuevo eslabón desconocido que se iba encontrando.

Sin embargo, todos estos razonamientos sólo son aplicables a la evolución ulterior de la vida en la Tierra, al periodo del que poseemos un registro paleontológico más o menos completo, que abarca aproximadamente los últimos 500 millones de años, desde el Cámbrico en adelante. Como indiqué antes, este periodo no sólo es mucho más breve, sino además muy posterior a la época en que tuvo lugar el origen de la vida y sus primeros balbuceos. Y, sin embargo, se los suele tratar globalmente, extrapolando de una forma inaceptable los descubrimientos de la evolución posterior a la vida primitiva, y a menudo se omite en la bibliografía la diferenciación entre ambos.

SIETE PREMISAS

Permítaseme citar, como muy al caso, el libro recientísimo y autorizadísimo de KERKUT —1960—, el cual, en un ensayo muy meditado, adopta frente a la evolución una actitud curiosamente crítica. Afirma KERKUT que la teoría evolucionista se basa en siete premisas que constituyen conjuntamente la "Teoría general de la evolución". Véase cómo las enumera en la página 6:

1) Materia no viviente dio origen al material vivo, es decir, que se produjo la generación espontánea *.

2) Dicha generación espontánea ocurrió solamente una vez. (Según KERKUT, todas las demás premisas derivan de la segunda.)

3) Todos los virus, bacterias, plantas y animales están relacionados entre sí.

4) Los protozoos dieron origen a los metazoos.

* Como afirmé anteriormente, no me parece feliz la expresión "generación espontánea" en este contexto. En la página 7 de su obra usa KERKUT, como sinónimo, el término "biogénesis", acuñado, según creo, por BERNAL. Es el que yo empleare también aquí para designar el paso de lo no viviente a lo viviente.

5) Los diversos *phyllum* de invertebrados están relacionados entre sí.

6) Los invertebrados dieron origen a los vertebrados.

7) Dentro de los vertebrados, los peces produjeron los anfibios; los anfibios dieron lugar a los reptiles; los reptiles, a las aves y mamíferos.

Las dos primeras premisas citadas se refieren al origen de la vida sobre la Tierra; las cinco siguientes, a su evolución ulterior. De aquí que no se las pueda comparar en significado y alcance. En la medida de mis conocimientos, es éste el último caso en que se ha confundido el origen de la vida con su evolución posterior.

Por consiguiente, las cinco últimas suposiciones enumeradas por KERKUT caen fuera del propósito de este libro. Pero, por completar un poco el tema, habré de añadir algunas observaciones más.

Soy de opinión que los tratados modernos acerca de la evolución habían contestado ya a las objeciones opuestas a las cinco premisas de referencia. Podemos remitir al lector, por ejemplo, a SIMPSON —1949—. Sin embargo, debe observarse que, aun dentro de esas cinco premisas, las correspondientes a los números 3) a 6) no están, ni con mucho, en el mismo plano que la 7). Acaso sería más exacto decir que algún pez dio origen a los anfibios; algunos reptiles, a los mamíferos y aves, ya que, por un lado, sólo ciertos grupos estructurales estrictamente definidos, concretos, entre las familias primitivas, dieron paso a la organización superior, mientras que, por otro lado, sigue considerándose como muy posible el origen polifilético de estas especies más desarrolladas. Ahora bien, formuladas así las cosas, la hipótesis 7) se basa en hechos reales, es decir, en el registro general de observaciones paleontológicas, mientras que las formuladas en los números 3) a 6) sólo se basan en analogías observadas en las fauna y flora actuales, pero sin apoyo alguno por parte del registro histórico paleontológico.

Volvamos ahora a las premisas 1) y 2). La sustancia de lo que hemos aprendido es que, conforme a una teoría aceptada universalmente por los biólogos, la materia orgánica se originó mediante procesos inorgánicos, y que posterior y consiguientemente, la materia no viva se transformó en materia viva como resultado de su desarrollo. Los hechos que se han podido espigar en el campo de la Geología apoyan la probabilidad de que se diera efectivamente el ambiente que postula y exige esa teoría, es decir, la atmósfera anoxigénica. Naturalmente, esto no es una prueba de que tuviera que producirse la biogénesis; sólo prueba la viabilidad de esa teoría. Por consiguiente, queda justificada la premisa número 1).

A mi juicio, la segunda premisa de KERKUT no hace la debida justicia a todas las posibilidades que caben en la biogénesis. Aun suponiendo que ciertas reacciones fotosintéticas inorgánicas de índoles parecidas dieran, por ejemplo, origen simultáneamente, pero en diversos sitios, a materias orgánicas semejantes, y que posteriormente materia no viva diera origen a seres vivos, siguiendo algunas trayectorias paralelas, e incluso muchas, estimo que todavía podríamos considerar que tales seres vivos primitivos estaban relacionados entre sí. Igualmente podemos considerar interrelacionados a los mamíferos, aunque existe la posibilidad de orígenes polifiléticos de diferentes líneas evolutivas dentro de un mismo *phyllum,* procedentes de líneas de reptiles tipo mamífero diferentes, pero íntimamente relacionados. Tal vez se dejó arrastrar demasiado por las ideas de historiador práctico en Geología con preferencia a la razón puramente filosófica. Pero, a mi juicio, nunca seremos capaces de demostrar si la biogénesis tuvo lugar una sola vez o muchas. Ahora bien, mientras se puedan comparar los resultados y éstos se produzcan en el transcurso de una historia similar, está justificado el empleo del término "relacionados".

POSIBILIDAD DE BIOGENESIS MULTIPLES

De aquí se deduce que la premisa número 2, según la cual la biogénesis se produjo una sola vez, es innecesaria. Es más, podemos argüir contra ella y suponer que se produjo la biogénesis múltiple. Hemos visto que la historia geológica opera dentro de periodos enormemente largos, durante los cuales la acumulación de pequeños efectos puede producir a la larga importantes consecuencias. Hemos indicado la probabilidad del transcurso de un periodo larguísimo en la historia primitiva

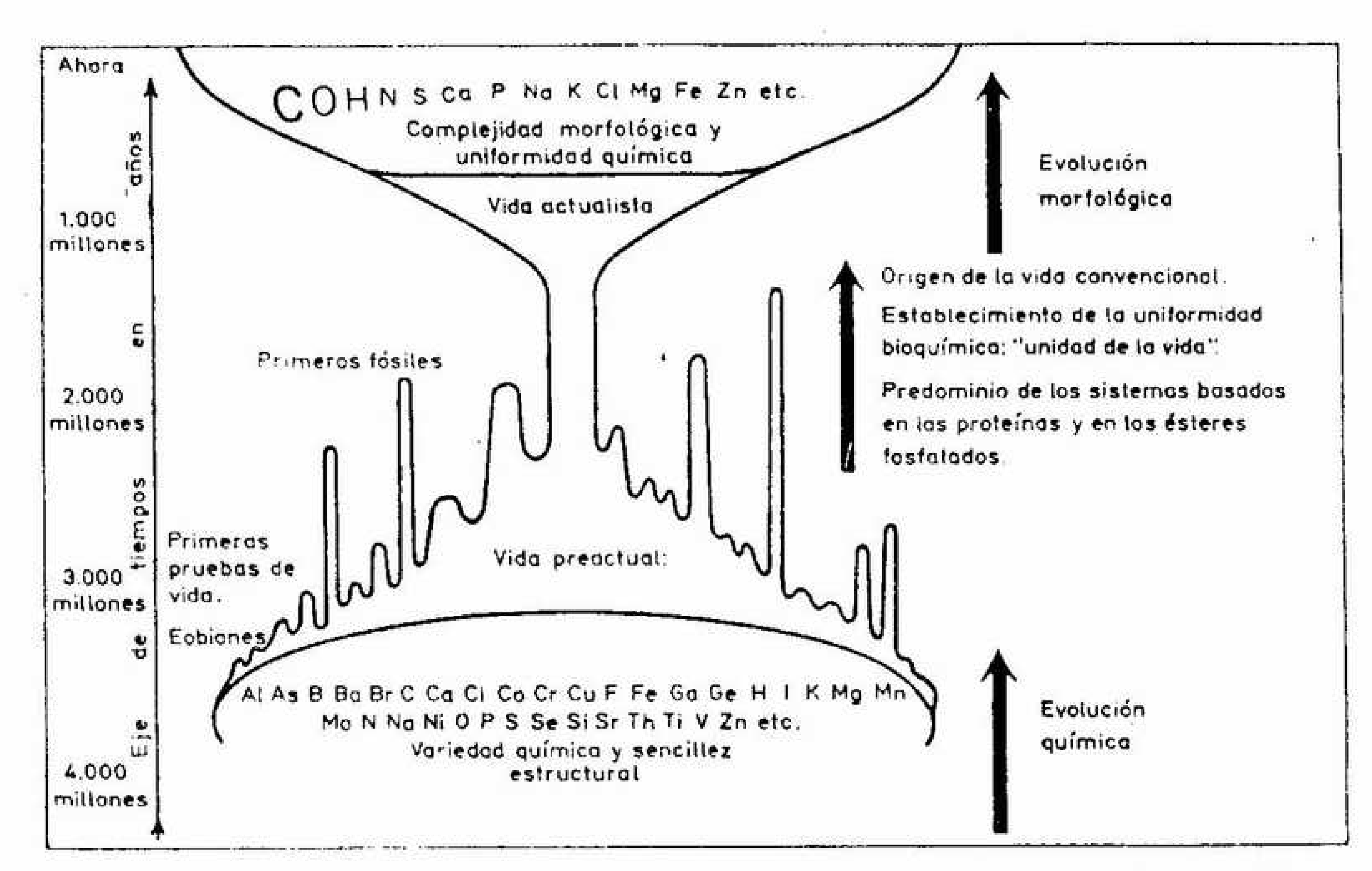


Fig. 34. Representación simplificada del origen y desarrollo de la vida en la Tierra. Es el dibujo de Pirie —compárese la figura 14— vuelto a dibujar de acuerdo con los aspectos geológicos del origen de la vida en nuestro planeta.

de la vida en que coexistieron las reacciones fotosintéticas inorgánicas, que dieron origen a los materiales "orgánicos" del "caldo claro", la protovida y la vida primitiva. Es muy posible que la vida fluyese por muchos cauces diferentes y en muchas épocas distintas durante el transcurso de ese periodo. Pero la selección natural debió ser intensísima durante el periodo de transición a la atmósfera oxigénica, y posiblemente actuó entonces en ese amplio campo de formas posibles de vida, reduciéndolas eventualmente hasta el comienzo de nuestra vida posterior. Esto es lo que esquematizo en esta segunda versión del doble cono de Pirie —Fig. 34—.

Desde luego que todo esto es pura hipótesis; pero una hipótesis que se deduce lógicamente de los hechos conocidos y que no se opone además a los hechos registrados por la Geología. Por otra parte, y para volver al punto de partida de este capítulo, es un problema totalmente distinto del estudio de la evolución ulterior de la vida en la Tierra, el cual, por lo que se refiere a animales dotados de concha o esqueleto, se basa en datos registrados en los archivos de la Paleontología.

CAPITULO 11

Conclusiones

LO QUE SABEMOS

En la figura 36 se presenta el compendio de las conclusiones factuales deducidas de nuestro estudio sobre los aspectos geológicos del origen de la vida en la Tierra. La figura 35 es un esquema complementario que sirve de término de comparación a la figura 36. Está tomada del paleontólogo y estratígrafo americano Raymond C. Moore —1958— y muestra qué es lo que interesa normalmente a la Geología, es decir, al estudio de la historia de la Tierra, en que la cronometría está basada en el registro de los restos fósiles. La información detallada de este tipo empieza prácticamente en la base del Paleozoico, con el sistema Cámbrico, en el que aparecen ya representados nueve de cada diez *phyllum* del reino animal. Por lo demás, se conoce muy poco acerca de los periodos anteriores; todas las líneas genealógicas de esas remotísimas épocas aparecen punteadas, salvo la de los microbios. Además, todo surge de unos principios nebulosos hace más o menos unos 1 200 millones de años.

En la figura 36 he vuelto a trazar, a escala diferente, la gráfica de Moore para destacar esos periodos primitivos de la historia de la Tierra. En ella se aprecia inmediatamente lo relativamente corto que resulta el tiempo transcurrido desde el principio del Paleozoico, comparado con el periodo previo en que ya existió vida sobre la Tierra. Los principios nebulosos no corresponden a esos 1 200 millones de años, sino que poseemos auténticos fósiles que datan ya de unos 1 600 millones, e incluso hay indicios más antiguos de la presencia de la vida en la Tierra.

Aparte de los fósiles y parafósiles, hay vestigios concretos de que nuestro planeta tuvo ciertamente una atmósfera anoxigénica, de carácter reductor, hace unos 2 000 millones de años. Algunas de las indicaciones de la existencia de la vida en

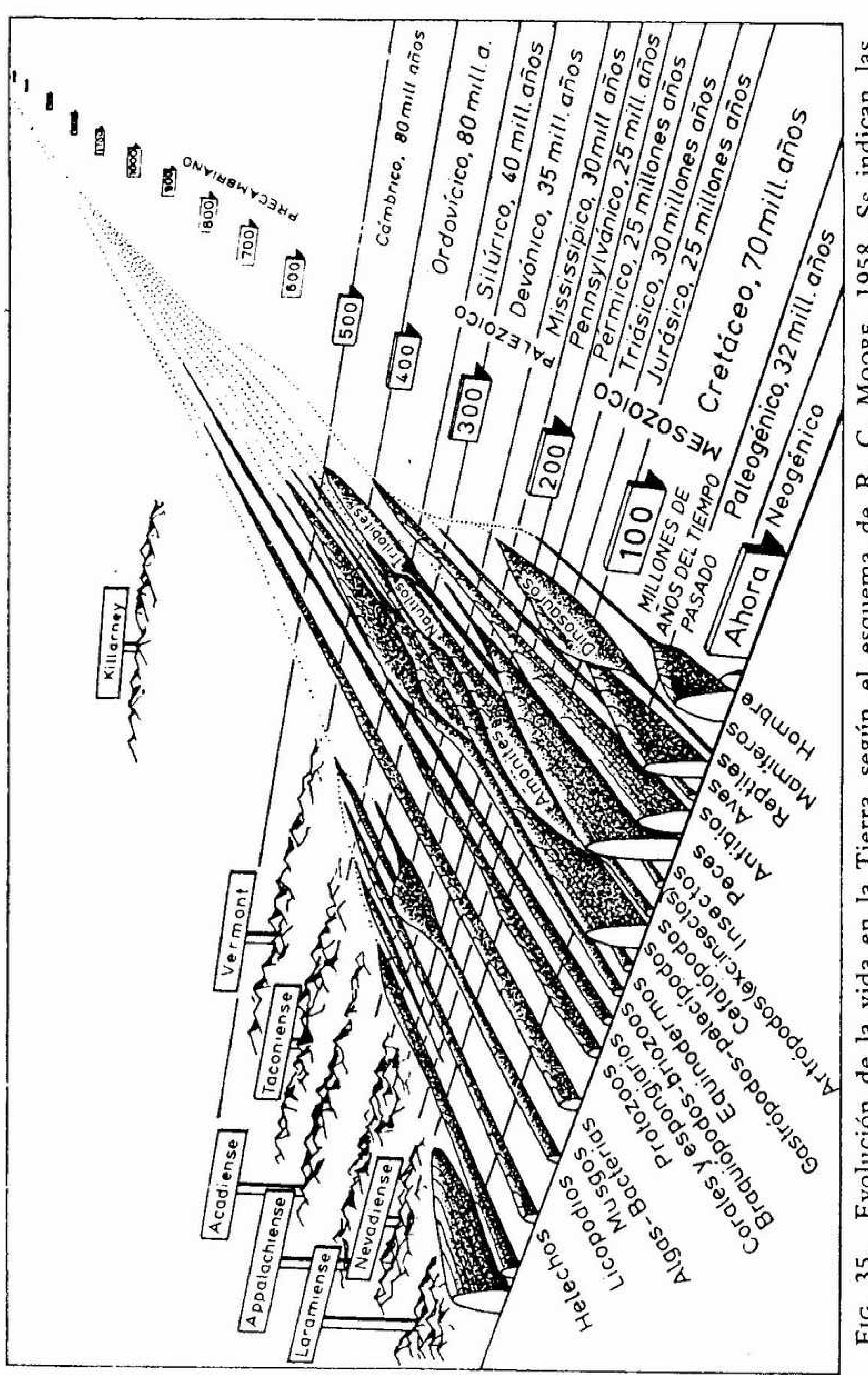


FIG. 35. Evolución de la vida en la Tierra, según el esquema de R. C. MOORE, 1958. Se indican las principales ramas de plantas y animales y su desarrollo evolutivo en el transcurso de los tiempos.

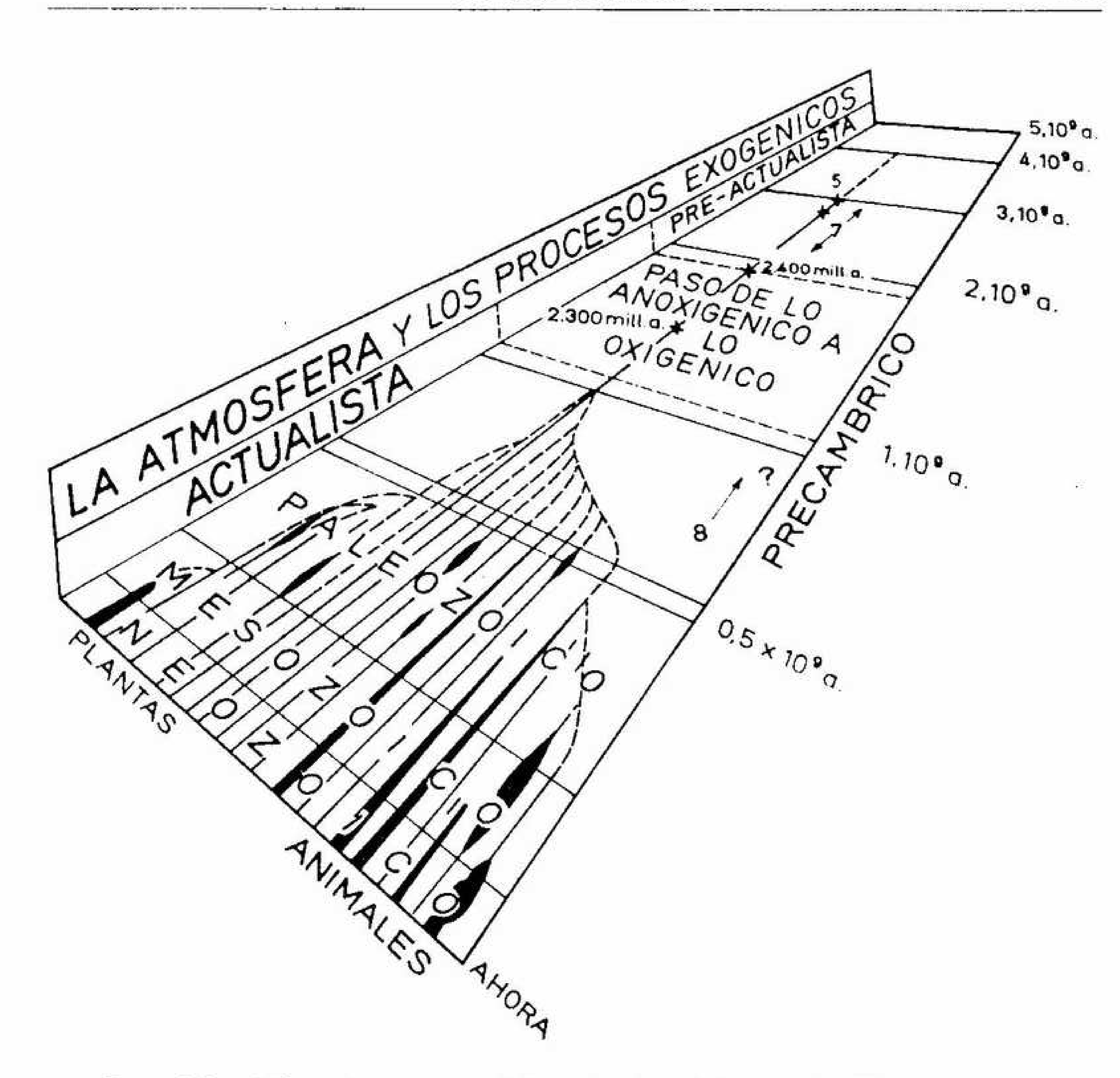


FIG. 36. Historia esquemática de la vida en la Tierra. 1) Secreciones biogénicas calizas, de Sudáfrica, descritas por MACGREGOR. 2*a*) Primeros fósiles auténticos, del Canadá, descritos por TYLER y BARGHOORN. 2*b*) Yacimientos anoxigénicos de Blind River, Canadá, descritos por RAMDOHR. 3) Arrecifes algales tipo *Collenia*, de Africa, descritos por GRAVELLE y LELUBRE. 4) Rocas no oxidadas de Finlandia, descritas por RANKAMA. 5) Yacimientos anoxigénicos de Dominion Reef, en Sudáfrica, descritos por RAMDOHR. 7) Formaciones anoxigénicas de hierro, del Canadá y Montana, descritas por LEPP y GOLDICH. 8) Edad aproximada de los primeros lechos rojos. Para la localización geográfica de los números 1) a 7), véase la figura 15.

nuestro Planeta son aún más antiguas; tenemos, por consiguiente, pruebas de la existencia temprana de una vida primitiva anoxigénica sobre nuestro planeta.

La presencia de nuestra atmósfera oxigénica actual se ha


FIG. 35. Evolución de la vida en la Tierra, según el esquema de R. C. MOORE, 1958. Se indican las principales ramas de plantas y animales y su desarrollo evolutivo en el transcurso de los tiempos.

podido fijar ya en una fecha aproximada de 1 000 millones de años. El paso de la atmósfera primitiva, anoxigénica, a la oxigénica actual tuvo lugar dentro de esas dos épocas, o sea entre los 2 000 millones de años —en que se sitúan las indicaciones más recientes hasta ahora conocidas de atmósfera anoxigénica— y los 1 000 millones de años —en que se sitúan los yacimientos más antiguos actualmente conocidos, originados bajo atmósfera oxigénica—.

Esa transición se debió, con toda probabilidad, a actividad orgánica. Se formó oxígeno libre, liberado por organismos que adquirieron la habilidad de asimilar el carbono y producir oxígeno mediante descomposiciones del dióxido de carbono mediante fotosíntesis orgánica. Sólo después de que la vida primitiva adquirió la capacidad de este nuevo tipo de metabolismo pudo establecerse de modo permanentemente en la Tierra algo que se pareciese a nuestro reino vegetal actual. El reino animal es, naturalmente, todavía más joven —aunque acaso no mucho más—, puesto que se nutre del carbono transformado en sustancias orgánicas por las plantas gracias a la fotosíntesis orgánica, proceso de que son incapaces los animales.

Sin embargo, el reino animal estaba ya bien establecido a finales de los tiempos precámbricos. Por consiguiente, y hablando en términos generales, la transición de la atmósfera primitiva anoxigénica a la actual oxigénica no sólo tuvo lugar entre esos dos periodos de 1 00 y 2 000 millones de años, sino también el subsiguiente desarrollo de los primitivos antepasados de nuestros actuales reinos vegetal y animal.

LO QUE NUNCA SABREMOS

Después de esta enumeración de los hechos que poseemos sobre la historia primitiva de la vida sobre la Tierra, podemos preguntarnos qué tipo de cuestiones podemos suponer que escaparán para siempre a nuestra investigación. Así, por ejemplo, nunca sabremos con certeza la naturaleza exacta de esos primeros procesos inorgánicos de fotosíntesis que se piensa que produjeron el material orgánico en el "caldo claro". Esos compuestos no tendrían ninguna forma morfológica distintiva, y

sólo por su morfología, por su configuración, podemos reconocer los fósiles como tales.

Tampoco podemos esperar llegar a darnos cuenta cabal de la evolución de la vida primitiva subsiguiente, que muy probablemente coexistió con la fase última del crecimiento puramente inorgánico de las moléculas "orgánicas". Se podrán hallar fosilizados algunos elementos de esa vida primitiva, preservados en su estructura, igual que hemos encontrado ahora depósitos de material constituidos por esos seres vivos. Pero tal material fósil será siempre escasísimo. Cuando más, encontraremos un fósil aquí y otro allí, pero jamás los suficientes como para poder constituir unas líneas evolutivas comparables con las que se han establecido para la evolución ulterior de las formas más elevadas de vida, dotadas de estructuras morfológicas más complejas.

LO QUE PUEDE ENSEÑARNOS LA INVESTIGACION ULTERIOR

Es de esperar que la investigación ulterior ampliará estos hallazgos valiosos de fósiles primitivos, bien correspondan al periodo más antiguo preactualista o a los albores de nuestra vida actual. Esos descubrimientos afortunados podrán suministrarnos en el futuro una información documental mucho más sustancial sobre la vida primitiva que la que poseemos actualmente.

Más aún, podemos esperar con fundamento que campañas cartográficas más intensas de los escudos antiguos nos suministrarán correlaciones más exactas entre las series de rocas de que se componen. Al disponer de mayor número de dataciones absolutas, se podrán asignar igualmente edades absolutas más seguras a esos hallazgos fósiles, tanto antiguos como más jóvenes.

Otro resultado perfectamente posible, y a mi juicio importantísimo, será que llegaremos a conocer más y mejor el ambiente de la vida primitiva. Si encontramos más sitios en donde podamos asegurar que se formaron sedimentaciones bajo circunstancias atmosféricas anoxigénicas primitivas, u oxigénicas actuales, y podemos asignarles edades de mayor garantía, se podría calcular con mayor aproximación el tiempo en que se verificó la transición de la atmósfera primitiva a la actual.

Y si llegásemos un día a estimar la época en que ocurrió de hecho esa transición, ello a su vez podría darnos una idea del ritmo real de la producción biogénica de oxígeno libre, lo cual posee, naturalmente, gran valor para los biólogos interesados en el ritmo metabólico de la vida primitiva.

OBSERVACION FINAL

Habiendo resumido así lo que sabemos, lo que no llegaremos a saber nunca y lo que esperamos poder aprender en los años venideros, podemos formular nuestra conclusión final, a saber: que los descubrimientos de la Geología concuerdan plenamente con las concepciones biológicas modernas acerca del origen de la vida en la Tierra, mediante la acción de las causas naturales. Aunque es evidente que tal convergencia no es prueba de la corrección de esas recientes teorías biológicas, al menos proporciona un final gratísimo a nuestros estudios sobre uno de los problemas más intrigantes de la Ciencia actual.

Bibliografía

AHRENS, L. H., 1955: "Oldest rocks exposed". *Geol. Soc. Am., Spec. Paper* 62: 155-168.

AULT, W. U., 1959: "Isotopic fractionation in geochemical processes." En: P. H. ABELSON (Editor), *Researches in Geochemistry*. Wiley and Sons, Nueva York, pp. 241-259.

BERNAL, J. D., 1949: "The physical basis of life". *Proc. Phys. Soc. (London)*, A, 62: 537-558; B, 62 : 597-618.

— 1959: "The problem of stages in biopoesis." En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, pp. 38-53.

BIJVOET, J. M., KOLKMEIJER, N. H. y MACGILLAVRY, C. H., 1948: *Röntgenanalyse van Kristallen*. Centen, Amsterdam, 300 pp.

DERRY, D. R., 1959: "Evidence of the origin of Blind River uranium deposits—A progress report." *Geol. Soc. Am., Bull.* 70: 1587.

ENGELHARDT, W. Freiherr VON, 1959: "Kreislauf und Entwicklung in der Geschichte der Erdrinde." *Nova Acta Leopoldina*, 21 (143): 85-99.

EPSTEIN, S., 1959: "The variations of the O^{18}/O^{16} ratio in nature and some geologic implications." En: P. H. ABELSON (Editor), *Researches in Geochemistry*. Wiley and Sons, Nueva York, pp. 217-240.

FOLINSBEE, R. E., BAADSGAARD, H. y LIPSON, J., 1960: "Potassium argon time scale." En: TH. SORGENFREI (Editor), *Repts. 21st Intern. Geol. Congr., Copenhagen*, 3: 7-17.

FURON, R., 1960: *Géologie de l'Afrique*. Payot, París, 2.ª ed., 400 pp.

GASTIL, G., BLAIS, R., KNOWLES, D. M. y BERGERON, R., 1960: "The Labrador geosyncline." En: TH. SORGENFREI *(Editor)*, *Repts. 21st Intern. Geol. Congr., Copenhagen*, 9: 21-38.

GLAESSNER, M., 1961: "Pre-Cambrian animals." *Sci. American*, 204: 72-78.

GOLDICH, S. S. y col., 1961: "The Precambrian geology and geochronology of Minnesota." *Minnesota Geol. Surv., Bull.*, 41: 1-193

GRAVELLE, M. y LELUBRE, M., 1957: "Découverte de Stromatolithes du groupe des Conophyton dans le Pharusien de l'Ahaggar occidental (Sahara Central)." *Bull. Soc. géol. France*, 7: 435-442.

GUSSOW, W. C., 1959: "Athabasca formation of Western Canada." *Geol. Soc. Am., Bull.*, 70: 1-18.

HOOYKAAS, R., 1959: *Natural Law and Divine Miracle*. Brill, Leiden, 237 pp.

HOLMES, A., 1947 a: "The construction of a geological time-scale." *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 21 (1): 117-152.

— 1947 b: "A revised estimate of the age of the earth." *Nature*, 159: 127-128.
— 1954: "The oldest dated minerals of the Rhodesian shield." *Nature*, 173: 612-614
— 1960: "A revised geological time-scale." *Trans. Edinburg Geol. Soc.*, 17: 183-216.
INGERSON, E., 1953: "Nonradiogenic isotopes in geology: a review." *Geol. Soc. Am., Bull.*, 64: 301-374.
KERKUT, G. A., 1960: *Implications of Evolution*. Pergamon Press, Londres, 174 pp.
KLABUNOVSKII, E. I., 1959: "Absolute asymmetric synthesis and asymmetric catalysis." En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, pp. 158-168.
KLUYVER, A. J., 1955: "Microbe en leven." *Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap., Jaarb.* 1954 (5), 27 pp.
KULLERUD, G., 1959: "Sulfide systems as geological thermometers." En: P. H. ABELSON (Editor), *Researches in Geochemistry*. Wiley and Sons, Nueva York, pp. 301-335.
KULP, J. L., 1955: "Isotopic dating and the geologic time scale." *Geol. Soc. Am., Spec. Paper* 62: 609-630.
— 1960: "The geological time scale." En: TH. SORGENFREI (Editor), *Repts. 21st Intern. Geol. Congr., Copenhagen*, 3: 18-27.
LEPP, H. y GOLDICH, S. S., 1959: "Chemistry and origin of iron formations." *Geol. Soc. Am., Bull.*, 70: 1637.
LIEBENBERG, W. R., 1960: "On the origin of uranium, gold and osmiridium in the conglomerates of the Witwatersrand goldfields." *Neues Jahrb. Mineral., Abhandl.*, 94: 831-867 (Festband Ramdohr, II).
LYELL, C., 1866-68: *Principles of Geology: Being an Enquiry how far the former Changes of the Earth's Surface are referable to Causes now in Operation*, 10.ª ed., 2 vols., Londres.
— 1873: *On the Geological Evidences of the Antiquity of Man, with Remarks on Theories of the Origin of Species by Variation*. 4.ª ed., Londres.
MACGREGOR, A. M., 1940: "A pre-Cambrian algal limestone in Southern Rhodesia." *Trans. Geol. Soc. S. Africa*, 43: 9-16.
MILLER, S. L., 1959: "Formation of organic compounds on the primitive earth." En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, pp. 123-135.
— 1960: "Formation of organic compounds on the primitive earth." En: M. FLORKIN (Editor), *Aspects of the Origin of Life*. Pergamon Press, Oxford, pp. 85-97.
MOORE, R. C., 1958: *Introduction ot Historical Geology*. McGraw-Hill, Nueva York, 2.ª ed., 656 pp.
OPARIN, A. I., 1938: *The Origin of Life*. Dover Publications, Nueva York, 2.ª ed., 270 pp.
— (Editor), 1959: *The Origin of Life on Earth*. Proc. 1st Intern. Symposium Intern. Union Biochem., IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, 436 pp.

PIRIE, N. W., 1957: "The origins of life. Moscow symposium." *Nature*, 180: 886-888.
— 1959: "Chemical diversity and the origins of life." En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, pp. 76-83.
POLKANOV, A. A. y GERLING, E. K., 1960: "The pre-Cambrian geochronology of the Baltic shield." En: TH. SORGENFREI (Editor), *Repts. 21st. Intern. Geol. Congr., Copenhagen*, 9: 183-191.
POSTGATE, J., 1954: "The sulphur bacteria." *New Biol.*, 17: 58-76.
RAMDOHR, P., 1958: "Die Uran- und Goldlagerstätten Witwatersrand, Blind River District, Dominion Reef, Serra de Jacobina: Erzmikroskopische Untersuchungen und ein geologischer Vergleich." *Abhandl. deut. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Chem., Geol. u. Biol.*, 3: 35+XIX pp.
RANKAMA, K., 1955: "Geologic evidence of chemical composition of the Precambrian atmosfere." *Geol. Soc. Am., Spec. Paper* 62: 651-663.
RUBEY, W. W., 1955: "Development of the hydrosphere and atmosphere, with special reference to probable composition of the early atmosphere." *Geol. Soc. Am., Spec. Paper* 62: 631-650.
RUTTEN, M. G., 1957: "Origin of life on earth, its evolution and actualism." *Evolution*, 11: 56-59.
RUSSEL, R. D. y FARQUAR, R. M., 1960: *Lead Isotopes in Geology*. Interscience, Nueva York-Londres, 251 pp.
SAPOZHNIKOW, D. J., 1959: "Entstehung und Evolution der phototropen Ernährungsweise." En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, pp. 635-641.
SHAPLEY, H., 1953: "On climate and life." En: H. SHAPLEY (Editor), *Climatic Change*. Harvard Univ. Press, Cambridge (Mass.), pp. 1-12.
SIMPSON, G. G., 1949: *The Meaning of Evolution*. Yale Univ. Press. Abridged edition: Mentor Books, Nueva York, 1951, 192 pp.
TERENIN, A. N., 1959: "Phothosynthesis in the shortest ultraviolet." En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, pp. 136-139.
TERENT'EV, A. P. y KLABUNOVSKII, E. I., 1959: "The role of dissimetry in the origin of living material" En: A. I. OPARIN (Editor), *The Origin of Life on Earth*. IUB Symposium Series, Vol. I, Pergamon Press, Londres, pp. 95-105.
TILTON, G. R. y DAVIS, G. L., 1960: "Geochronology." En: P. H. ABELSON (Editor), *Researches in Geochemistry*. Wiley and Sons, Nueva York, pp. 190-216.
TYLER, S. A. y BARGHOORN, E. S., 1954: "Occurrence of structurally, preserved plants in the pre-Cambrian rocks on the Canadian shield." *Science*, 119: 606-608.
— 1962: Full report to be published by the *Geol. Soc. Am.*, either in the *Bull.* or as *Spec. Paper*.
UREY, H. C., 1951: *The Planets, their Origin and Development*. Yale Univ. Press. Nueva Haven, 245 pp.
WEXLER, H., 1953: "Radiation balance of the Earth as a factor in climatic change." En: H. SHAPLEY (Editor), *Climatic Change*. Harvard Univ. Press. Cambridge (Mass.), pp. 73-106.

WILSON, A. T., 1960: "Synthesis of macromolecules." *Nature*, 188: 1007-1009.
WILSON, A. E., 1957: "Life in the Proterozoic." En: J. E. GILL (Editor), The Proterozoic of Canada. *Roy. Soc. Canada, Spec. Publ.* 2: 18-27.
WINKLER, K. C., 1960: "Virus mirabile." En: H. W. OBBINK y otros, *Leven en Dood.* Bohn, Haarlem, pp. 86-99.
YOUNG, R. B., 1940 a: "Further notes on algal structures in the Dolomite Series." *Trans. Geol. Soc. S. Africa.* 43: 17-22.
— 1940 b: "Note on an unusual type of concretionary structure in limestones of the Dolomite Series." *Trans. Geol. Soc. S. Africa,* 43: 23-26.
ZEUNER, F. E., 1951: *Dating the Past — An Introduction to Geochronology.* Methuen. Londres, 2.ª ed., 493 pp.

Indice de materias


EX LIBRIS Scan Digit
The Doctor
http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/
http://el1900.blogspot.com.ar/
http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/

GEOLOGIA (1)

Aspectos geológicos del origen de la vida sobre la Tierra

Hoy día, es muy grande el interés por las posibles causas del origen de la vida sobre la Tierra, por lo cual se realizan profundas investigaciones teóricas y prácticas en el campo de la Microbiología y de la Bioquímica.

Este libro proporciona los principios básicos geofilosóficos, tales como el actualismo y el uniformitalinismo, así como los puramente matemáticos, apoyados en datos numéricos.

Aunque la Geología no puede demostrar la validez de las nuevas concepciones biológicas del origen de la vida a través de causas naturales, las presentadas en este libro están en completo acuerdo con las exigencias de todas las teorías.

